



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Brandforsøg med centralt belastede stålsøjler

Olesen, Frits Bolonius

Publication date:
1980

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Olesen, F. B. (1980). *Brandforsøg med centralt belastede stålsøjler*. Institut for Bygningsteknik, Aalborg Universitetscenter. Aalborg Universitetscenter. Instituttet for Bygningsteknik. Report Nr. 8003

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK

INSTITUTE OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING

AALBORG UNIVERSITETSCENTER · AUC · AALBORG · DANMARK

FRITS BOLONIUS OLESEN

BRANDFORSØG MED CENTRALT BELASTEDE STALSØJLER

MARTS 1980

ISSN 0105-7421 RAPPORT NR. 8003

INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK

INSTITUTE OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING

AALBORG UNIVERSITETSCENTER · AUC · AALBORG · DANMARK

FRITS BOLONIUS OLESEN

BRANDFORSØG MED CENTRALT BELASTEDE STALSØJLER

MARTS 1980

ISSN 0105-7421 RAPPORT NR. 8003

Indhold

| | |
|--|-------|
| 1. Indledning | s. 3 |
| 2. Forsøgenes baggrund og formål | s. 5 |
| 3. Forsøgsplanlægning | s. 5 |
| 4. Prøvningsudstyr | s. 7 |
| 5. Geometrisk opmåling | s. 8 |
| 6. Temperaturmåling | s. 10 |
| 7. Ækvivalent søjlelængde | s. 11 |
| 8. Belastningshastighed | s. 13 |
| 9. Forsøgsresultater | s. 16 |
| 10. Sammenfatning og konklusion | s. 27 |
| 11. Afsluttende bemærkninger | s. 29 |
| 12. Litteratur | s. 30 |

FORORD

I nærværende rapport er redegjort for resultaterne af en serie brandforsøg med centralt belastede stålsøjler, udført i perioden december 1979 til marts 1980 på AUC's brandlaboratorium. Forsøgene er et delprojekt under 2. etape af det af Statens teknisk-videnskabelige Forskningsråd støttede projekt Brandteknisk konstruktionsprøvning.

Forsøgene, der har omfattet 30 fuldskalaprøvnings (efter en serie pilotforsøg omfattende 16 fuldskalaprøvnings), er planlagt i samarbejde med Dansk Brandværns-komité, der har ydet økonomisk støtte via en projektbevilling fra Teknologirådet, og med arbejdsgruppen NA 23.3, der er nedsat af Dansk Ingeniørforening, Normstyrelsen, med henblik på at få indarbejdet brandtekniske dimensioneringsmetoder i DS 412. Prøvelegemerne er leveret vederlagsfrit af Foreningen af danske stålbyggere.

Ved projektets gennemførelse og rapporteringen har følgende institutmedarbejdere medvirket:

Akademiingeniør Niels Jørgen Hviid (detailplanlægning af laboratoriarbejdet),

Laboratiemedarbejderne Knud Erik Olesen og Bent Rasmussen (laboratoriearbejdet),

Teknisk assistent Ingrid Christensen (tegnearbejde, foto og monterings),

Tegnereleverne Aase Madsen og Lotte Skjold Pedersen (bearbejdning og optegning af måledata),

Sekretær Ulla Pedersen (rapportskrivning).

Alle medvirkende takkes for godt samarbejde.

Aalborg, marts 1980

Frits Bolonius Olesen

BRANDFORSØG MED CENTRALT BELASTEDE STÅLSØJLER

Af civilingeniør Frits Bolonius Olesen, Aalborg Universitetscenter

1. Indledning

Brandteknisk dimensionering af bærende stålkonstruktioner, dvs. eftervisning af bæreevneforholdene under brandpåvirkning, kan foretages efter to principielt forskellige metoder.

Efter den ene metode baseres eftervisningen på et prøvnings- og klassifikationssystem, hvis princip er velkendt fra de fleste landes bygningsbrandlovgivning. Alt efter betydningen af et muligt svigt under en brand henføres den enkelte konstruktion til en bestemt klasse, karakteriseret ved en vis mindste brandmodstandsevne, altså et vist tidsrum, hvori konstruktionen under en prøvning er i stand til at udøve sin normale bærende funktion under en samtidig, nærmere angivet brandpåvirkning. De nærmere prøvningsomstændigheder og den standardiserede brandpåvirkning er herhjemme beskrevet i DS 1051.1.

Efter den anden metode baseres den brandtekniske dimensionering på en (hovedsageligt beregningsmæssig) eftervisning af, at konstruktionen under den "virkelige" (dimensionsgivende) brand, den kan tænkes udsat for, opfylder de stillede krav til dens bærende funktion, hvad enten disse er tidsmæssigt bestemt eller et krav om at kunne overleve branden. En dimensionering efter dette princip omfatter fire hovedpunkter:

1. Fastsættelse af sikkerhedsgrundlaget (overlevelseskrav og/eller tidsbegrænset modstandsevne), svigtkriterier samt lastkombinationen i det særlige (exceptionelle) lasttilfælde brand.
2. Bestemmelse af den dimensionsgivende brandlast (det termiske miljø, der omgiver konstruktionen under brandforløbet).
3. Bestemmelse af de indre temperaturforhold i konstruktionen under brandforløbet, jvf. pkt. 2.
4. Eftervisning af, at konstruktionen med de reducerede styrkeegenskaber ved de under pkt. 3 bestemte temperaturer opfylder

bæreevnekravene i h.t. pkt. 1.

De to metoders fundamentale, principielle forskelle og deres fordele og ulemper skal ikke diskuteres her. Det her omhandlede projekt drejer sig alene om bestemmelse af centralt belastede stålsøjlers bæreevne (udknækningslast) ved forskellige temperaturer og har således ikke blot relation til pkt. 4 af den sidstnævnte metode, men fuldt så meget til den første. For selv om standardprøvningsmetoden i princippet kræver en fuldskalaprøvning, hvorunder prøvelegemet er belastet som under virkelige forhold og understøttet på tilsvarende måde som i den statiske sammenhæng, hvori konstruktionen normalt indgår, lader disse prøvningsbetingelser sig ikke i almindelighed opfylde i praxis. Man må - alene af økonomiske grunde - i udstrakt grad benytte sig af interpolation mellem resultater fra allerede udførte prøvninger og iøvrigt - i tilfælde af, at fuldskalaprøvning ikke er økonomisk overkommelig eller praktisk gennemførlig overhovedet - basere den opnåelige klassifikationsbetegnelse på et forsigtigt ansat kriterium, fx. i form af en tilpås lavt sat maximal ståltemperatur.

Sådanne "kritiske ståltemperaturer" kendes fra adskillige landes klassifikationspraxis, normalt fixeret til én bestemt værdi beliggende i temperaturområdet $350 - 450^{\circ}\text{C}$, altså så lavt, at man med ret stor sikkerhed kan forudsige, at en fuldt forskriftsmæssig standardprøvning, om den blev udført (hvis det da i det hele taget kunne lade sig gøre), ville falde heldigt ud.

Fordelene ved en sådan lempelig administration af prøvningsbestemmelserne er indlysende (rent bortset fra, at den er uomgængelig), men den kan også afstedkomme betydelige fejlvurderinger. Alvorligst er selvfølgelig de tilfælde, hvor den "kritiske (tilladelige) ståltemperatur" er sat højt, fx. 450°C , og en given konstruktions faktiske kollapsestemperatur (ved standardbrandpåvirkning, normal last og understøtningsforhold svarende til virkeligheden) er fx. 350°C . Eller tilfælde, hvor det er temperaturgradienter, der er bestemmende for brandmodstandsevnen. Og modsætningsvis kan de konservativt ansatte værdier af den "kritiske ståltemperatur", som de nødvendigvis må være, utilsigtet komme til at virke prohibitivt for mange iøvrigt velmotiverede og brandmæssigt fuldt forsvarlige stålkonstruktioner, som i den givne situation har en kollapsestemperatur på fx. 650°C , og som måske med en ganske let isolering eller andre beskyttelsesmetoder (i visse tilfælde slet ingen) kunne klare de stillede klassifikationskrav efter en forskriftsmæssig standardbrandprøvning.

Begrebet "kritisk ståltemperatur" er således principielt meningsløst, når det benyttes unuanceret som klassifikationskriterium, da det netop ikke er

en materialeegenskab, men tværtimod en størrelse, der varierer inden for et meget bredt temperaturinterval (normalt ca. 350 - 650^o), alt afhængigt af belastningsmåden, konstruktionens aktuelle understøtningsforhold m.v. Når det alligevel fortsat benyttes i ret udstrakt grad, skyldes det formentlig usikkerhed med hensyn til pålideligheden af de beregningsmetoder, der i så stort omfang er blevet udviklet i de senere år, og som forekommer at måtte være det naturlige alternativ. Denne skepsis er forståelig, da mange forudsætninger endnu er diskutabel, og da der kun i begrænset omfang er foretaget experimentel verifikation af de forskellige metoder.

2. Forsøgenes baggrund og formål

Den gennemførte forsøgsrække har flere formål. Med baggrund i ovenstående indgår forsøgene for det første i den experimentelle del af et igangværende projekt med det formål at medvirke til opstilling af en realistisk beregningsmodel for stålsøjlers udknækning ved høje temperaturer. Projektet omhandler indledningsvis "centralt" belastede stålsøjler, men vil efterfølgende omfatte også excentrisk belastede stålsøjler, for hvilke der til dato kun forefindes yderst forenkede brandtekniske dimensioneringsmetoder. I denne del af projektet vil ligeledes problemet med temperaturgradienters indflydelse blive behandlet. Et sådant experimentelt underbygget analysearbejde synes påkrævet som alternativ til det hidtidige, unuancerede begreb "kritisk ståltemperatur".

For det andet har forsøgsrækken det formål at tilvejebringe en rimeligt repræsentativ experimentel dokumentation for, at det er på den sikre side at basere en brandteknisk dimensionering på de normale dimensioneringsudtryk for stålsøjler, jvf. eksempelvis DS 412, når flydespændingen og elasticitetsmodulens temperaturafhængighed tages i regning, fx. som foreslået af ECCS, jvf. litt. [1]. Denne forenkede dimensioneringsmetode er bl.a. skitseret i DIF-indstillingen, litt. [2], og viderebearbejdes af arbejdsgruppen NA 23.3 (Dansk Ingeniørforening, Normstyrelsen) med henblik på indførelse i DS 412.

Endelig har forsøgsrækken til formål at afprøve effektiviteten og egnetheden til hurtig afvikling af en større prøvningsopgave af det laboratorieudstyr, som er opbygget under 1. og 2. etape af det STVF-støttede projekt Brandteknisk konstruktionsprøvning.

3. Forsøgsplanlægning

Med henblik på forsøgsresultaternes direkte anvendelse i forbindelse med normarbejdet i NA 23.2. samt Dansk Brandværns-komité's udarbejdelse af

håndbogen "Stål og brand" er forsøgsprogrammet opstillet i et snævert samarbejde mellem de involverede parter.

Som grundlag for programmet er opstillet følgende forsøgsvariable, som ønskedes dækket af forsøgene:

- 1) Profiler svarende til søjlekurverne II og IV i DS 412
- 2) Slankhedstal i områderne ca. 100, ca. 150 og ca. 175
- 3) Temperaturniveau'erne 20°C, 200°C, 400°C og 550°C

svarende til ialt 6 serier á 4 forsøg (de 4 temperaturniveau'er). For hver serie er desuden gennemført en prøvning med forhåndslast svarende til brudlasten ved 400°C og opvarmning hertil i løbet af ca. 1 time, svarende til en typisk brandisoleret stålsøjle, der exponeres i h.t. standardbrandpåvirkningen ISO 834.

Som profil-variable er valgt

RHS 100×60×5 mm (søjlekurve II)

HE 100A (søjlekurve IV)

Som søjlelængde-variable er valgt

2400 mm

3600 mm

4200 mm

De hertil svarende 6 serier er benævnt H 24, H 36, H 42, R 24, R 36 og R 42, og hver enkelt af de ialt 30 prøvninger er identificeret med et løbenummer, jvf. følgende oversigt:

| Serie | Prøvenummer | Profil | Længde |
|-------|-------------------|--------------|---------|
| H 24 | H 24.06 - H 24.10 | HE 100A | 2400 mm |
| H 36 | H 36.01 - H 36.05 | HE 100A | 3600 mm |
| H 42 | H 42.01 - H 42.05 | HE 100A | 4200 mm |
| R 24 | R 24.06 - R 24.10 | RHS 100×60×5 | 2400 mm |
| R 36 | R 36.01 - R 36.05 | RHS 100×60×5 | 3600 mm |
| R 42 | R 42.01 - R 42.05 | RHS 100×60×5 | 4200 mm |

Forud for denne forsøgsrækkes gennemførelse er udført 3 serier pilotforsøg (ialt 16 prøvninger):

| Serie | Prøvenummer | Profil | Længde |
|-------|-------------------|--------------|---------|
| I 24 | I 24.01 - I 24.06 | IPE 120 | 2400 mm |
| H 24 | H 24.01 - H 24.05 | HE 100A | 2400 mm |
| R 24 | R 24.01 - R 24.05 | RHS 100×50×5 | 2400 mm |

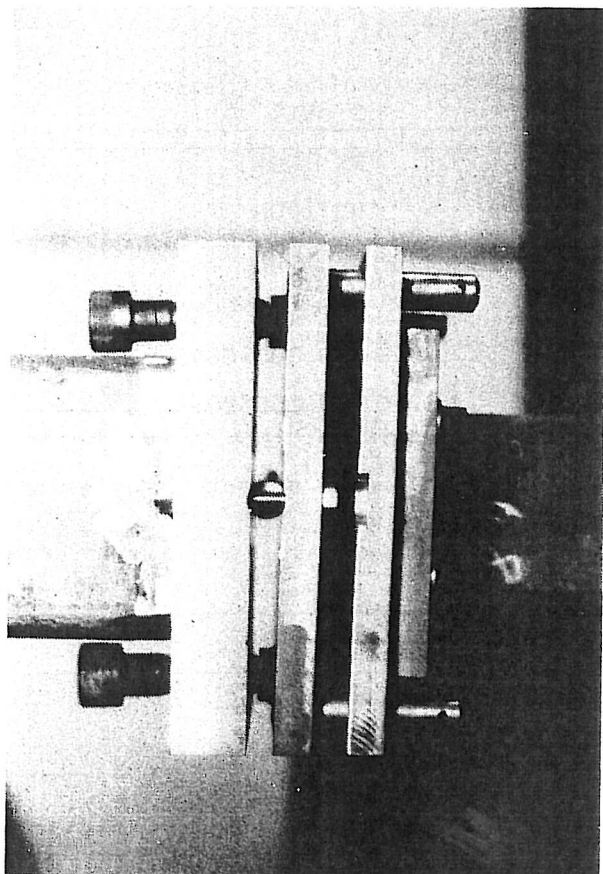
med det formål at få afklaret en række prøvningstekniske problemer (temperaturmåling, belastnings- og opvarmningshastighed m.v.).

Udover måling af temperaturer og belastninger omfatter forsøgene et program for detailleret opmåling af hvert enkelt prøvelegemes geometri og dets placering i belastningsarrangementet.

4. Prøvningsudstyr

Samtlige fuldskala-forsøg (ialt 46 incl. pilotforsøgene) er udført i brandlaboratoriets kombinerede brandkammer/bjælkeprøvemaskine, hvori prøvelegemet monteres og prøves i horisontal stilling med den "svage" akse lodret, så det sikres, at søjlen knækker ud i vandret plan (for at eliminere egenvægtens indflydelse på momenterne om udbøjningsaksen, selv om den er ganske ubetydelig i forhold til excentricitetsmomenterne). Den horisontale stilling er valgt, fordi temperaturforholdene i dette brandkammer er væsentligt mere ensartede end i søjleprøvemaskinens brandkammer, hvorved en næsten fuldstændig jævn temperaturfordeling langs prøvelegemet opnås, jvf. fig. 4. Prøvningsudstyret er nærmere beskrevet i litt. [3].

Belastningen påføres prøvelegemet gennem en i hver ende påsvejst monteringsplade, som skrues til en præcisionsfremstillet 40 mm lejeplade med en nøjagtigt centreret 20 mm lodret aksel. Dette sæt lejeplader, der genanvendes ved samtlige forsøg, påmonteres prøvelegemet, medens dette befinder sig på målebænken (se afsnit 5). Prøvelegemet monteres i belastningsarrangemen-



Figur 1. Prøvemaskinens lejekonstruktion. Til højre ses prøvelegemet og den herpå monterede lejeplade, der er præcist tilpasset prøve-maskinens lejeplade. Den lodrette aksel mellem lejepladerne sikrer lejets drejelighed og prøvelegemets uhindrede udbøjning i vandret plan.

tet, hvor et tilsvarende sæt lejeplader (med påsvejst vandret aksel) griber prøvelegemets lejeplader, hvorved de to sæt lejeplader er fixeret nøjagtigt i forhold til hinanden. De lodrette og vandrette aksler (svarende til henholdsvis Y-aksen og X-aksen, jvf. figur 2) sikrer en momentfri kraftoverføring. Efter monteringen foretages en let tilspænding af de to store stilleskruer i den lodrette systemplan (se figur 1), hvorved der introduceres et indspændingsmoment om X-aksen, som modvirker prøvelegemets eventuelle nedbøjning under opvarmningen, mens prøvelegemets understøtning langs Y-aksen forbliver drejelig. Lasten (max 500 kN) påføres med ønsket belastningshastighed med hydraulisk presse og måles med lastcelle med digital registrering.

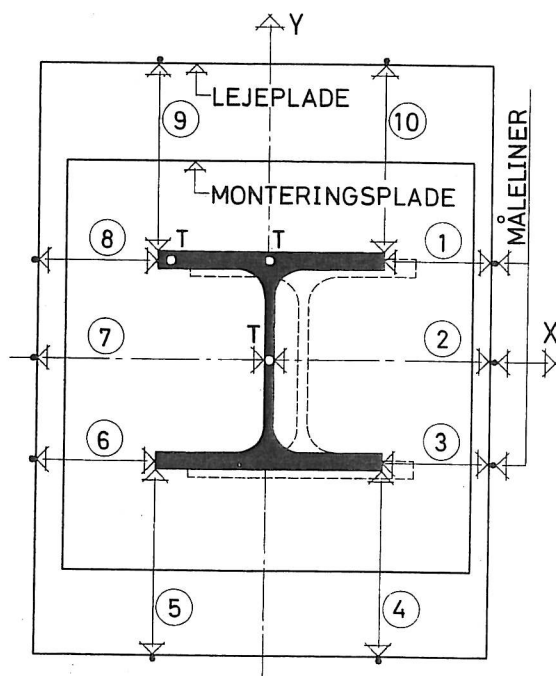
Brandkammeret er successivt opbygget med det fornødne antal modulære elementer (å 600 mm) i længderetningen i takt med prøvelegemernes varierende længder:

| | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|
| Prøvelegemets længde (mm) | 2400 | 3600 | 4200 |
| Brandkammerets indvendige længde (mm) | 1600 | 2800 | 3400 |
| Udragende del i hver ende (mm) | 300 | 300 | 300 |

For samtlige prøvelegemer er der således den samme afstand 350 mm fra lejets lodrette lejeakse til midtplanen i brandkammerets gavlelementer. Figur 4 viser geometrien for brandkammeret med et prøvelegeme af længden 2400 mm.

5. Geometrisk opmåling

Med henblik på så nøjagtigt som muligt at kunne rekonstruere det enkelte prøvelegemes geometri (tværsnit, forhåndskrumning etc.) og dets beliggenhed



Figur 2. Geometrisk opmåling af et prøvelegeme-tværsnits beliggenhed i forhold til systemplanerne X og Y, der er defineret og fysisk etableret gennem præcisionsudførelse af lejepladerne. T betegner placering af de tre indborede termoelementer i prøvens midt-tværsnit.

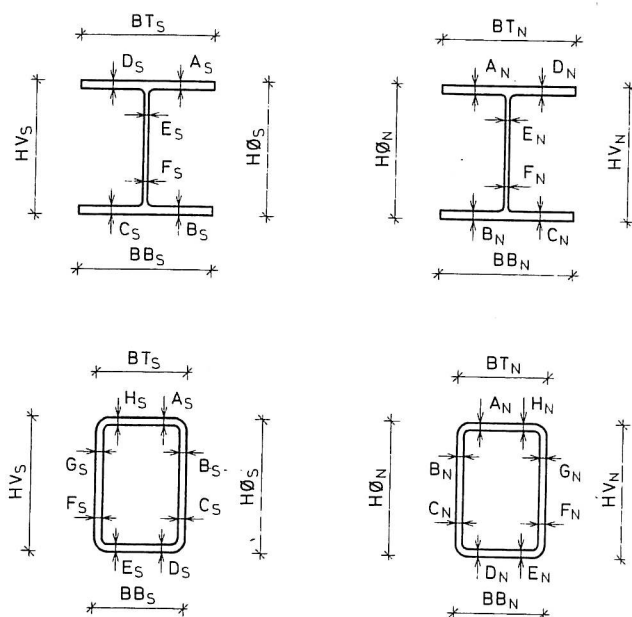
AALBORG UNIVERSITETSCENTER, BRANDLABORATORIET

PROJEKT: CENTRALT BELASTEDE STÅLSØJLER. OPMÅLING AF PRØVELEGERER.

SKEMA I

PRØVE NR.: H 36.05

OPMÅLT DATO: 5.3.1980



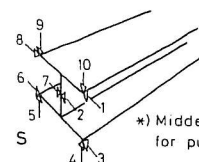
| | Σy mm | Nord mm | middel mm |
|----|------------------|-------------|--------------|
| A | 8,0/8,0 | 8,0/8,0 | 8,0 |
| B | 8,0/8,0 | 8,0/8,0 | 8,0 |
| C | 8,3/8,2 | 8,4/8,3 | 8,3 |
| D | 8,4/8,3 | 8,5/8,4 | 8,4 |
| E | 5,0/5,0 | 5,0/5,1 | 5,025 |
| F | 5,0/5,1 | 5,0/5,0 | 5,025 |
| G | | | |
| H | | | |
| BT | 99,8/99,8 | 99,8/99,7 | 99,775 |
| BB | 100,7/100,6 | 100,8/100,8 | 100,725 |
| HV | 97,4/97,4 | 97,3/97,4 | 97,375 |
| HØ | 96,6/96,5 | 96,7/96,7 | 96,625 |

AALBORG UNIVERSITETSCENTER, BRANDLABORATORIET

PROJEKT: CENTRALT BELASTEDE STÅLSØJLER. OPMÅLING AF PRØVELEGERER.

PRØVE NR.: H 36.05

OPMÅLT DATO: 5.3.1980



SKEMA II

Mål i mm.

*) Middelværdi af x-koordinat
for punkt 2 og 7

[illegible]

Figur 3. Eksempel på udfyldte dataskemaer til brug ved den geometriske opmåling af prøvelegemerne.

i forhold til kraftretningen under prøvningen er der gennemført en omfattende geometrisk opmåling forud for den enkelte prøvning.

På en til formålet specielt konstrueret målebænk er der foretaget opmåling af prøvelegemets godstykkelser, tværsnitsbredder og -højder m.v. i endetværsnittene før påsvejsning af monteringspladerne. De målte dimensioner er indført på et dataskema, skema I, som vist i eksempel på figur 3.

Efter påsvejsning af monteringspladerne er lejepladerne påmonteret prøvelegemet, hvis placering i forhold til systemplanerne X og Y kan justeres, således at en ønsket excentricitet kan opnås. For at være sikker på, at uensartede forhåndskrumninger ikke bevirker en S-formet udbøjningsfigur under den gradvise lastpåføring, er der givet hvert prøvelegeme en forhåndsexcentricitet i X-aksens retning af størrelsesordenen 1 o/oo af søjlelængden.

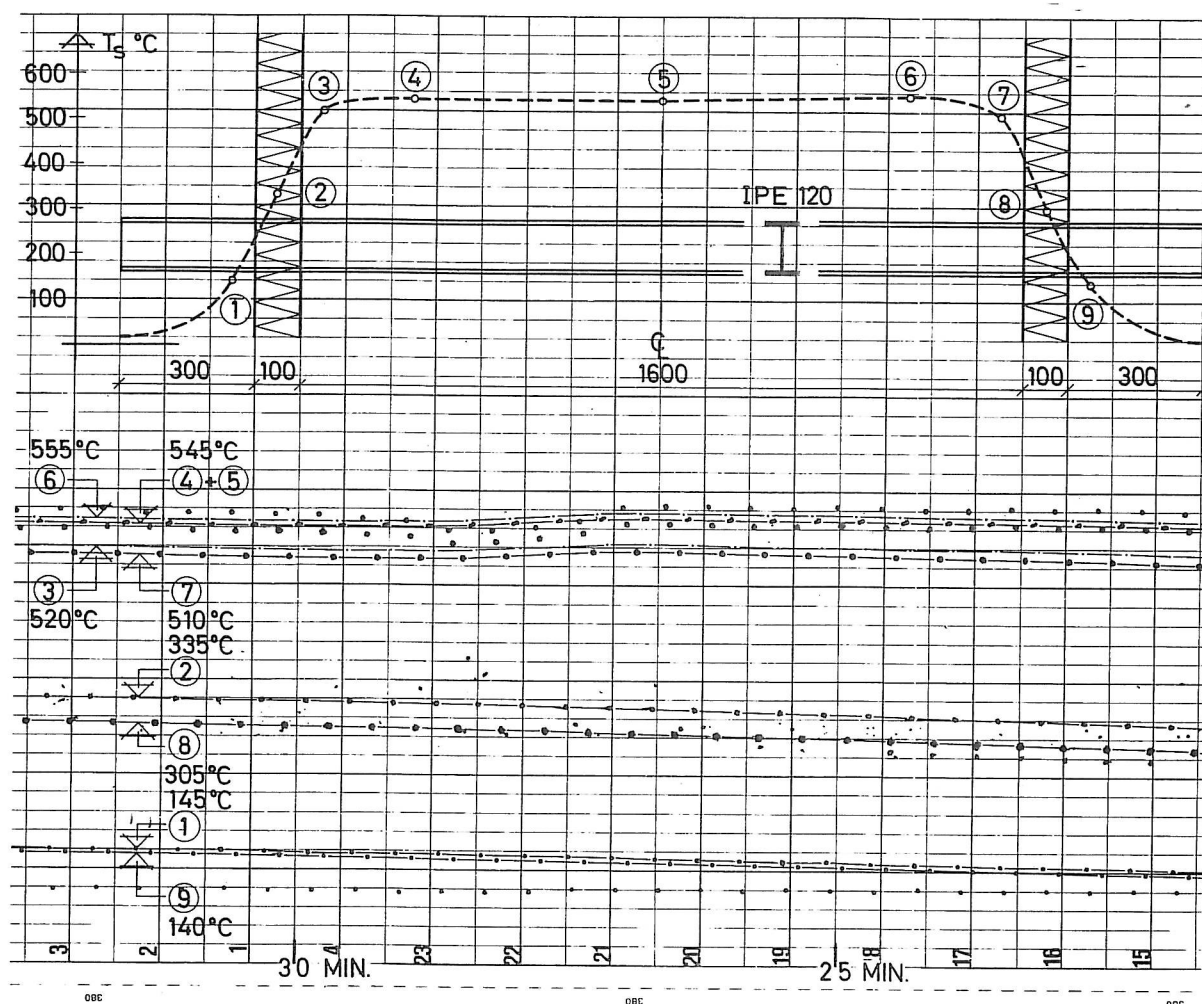
Ved hjælp af et sæt målelinier af nylon er afstandene (1) - (10), jvf. figur 2, opmålt og indført i skema II for hvert af tværsnittene C (midt tværsnittet), S1 - S6 og N1 - N6 med den indbyrdes afstand 300 mm hen langs søjleaksen. Disse mål er aflæst og indført i skemaet med værdier, der er et multiplum af 0,5 mm.

Opmålingerne er foretaget for samtlige prøvelegemer forud for prøvningerne, og kun for en enkelt prøvning (H 42.02) er der også foretaget opmåling efter prøvningen til kontrol af, at søjlen som forventet er knækket ud vinkelret på Y-planen. På figur 2 er beliggenheden af denne prøves midttværsnit før og efter prøvningen indtegnet fuldt optrukket henholdsvis punkteret.

6. Temperaturmåling

Gennem pilotforsøgsserien I 24 (uisolerede profiler) er dels undersøgt temperaturfordelingen over det enkelte tværsnit, dels temperaturfordelingen på langs ad prøvelegemet.

Med hensyn til temperaturens variation over tværsnittet viste de gennemførte forsøg, at temperaturen i 9 over tværsnittet jævnt fordelte målepunkter efter 10-12 minutters brandpåvirkning er stabiliseret inden for et interval af max 20°C bredde, således at dette intervals middeltemperatur med god tilnærmelse kan regnes repræsentativt for tværsnittets temperatur. På grundlag heraf er fastsat, at den termiske påvirkning af prøvelegemet styres gennem måling med ialt 4 termoelementer, hvoraf 3 er placeret i prøvelegemets midttværsnit (C) og 1 i 300 mm afstand herfra (serie H 24 og R 24) og 600 mm afstand herfra (de øvrige serier). Termoelementernes placering i midt-tværsnittet af et H-profil er vist på figur 2.



Figur 4. Måling af ståltemperaturens variation på langs ad prøvelegemet. Samtlige 9 målepunkter er placeret ca. 10 mm fra kanten af øverste flange og midt i denne.

Temperaturens variation på langs ad prøvelegemet er undersøgt gennem pilotforsøgene ved måling i forskellige tværsnit som vist på figur 4. Temperaturerne i kanten af profilets øverste flange er her registreret i 9 tværsnit gennem en ca. 10 minutters periode (fra ca. 22 til ca. 32 minutter efter brandpåvirkningens start). På grundlag af disse forsøg antages det rimeligt at regne prøvelegemets temperatur ensartet over hele den exponerede længde ind til midtplanen af galvelementerne og at måle den som middelværdien af de temperaturer, der registreres med de ovennævnte 4 termoelementer.

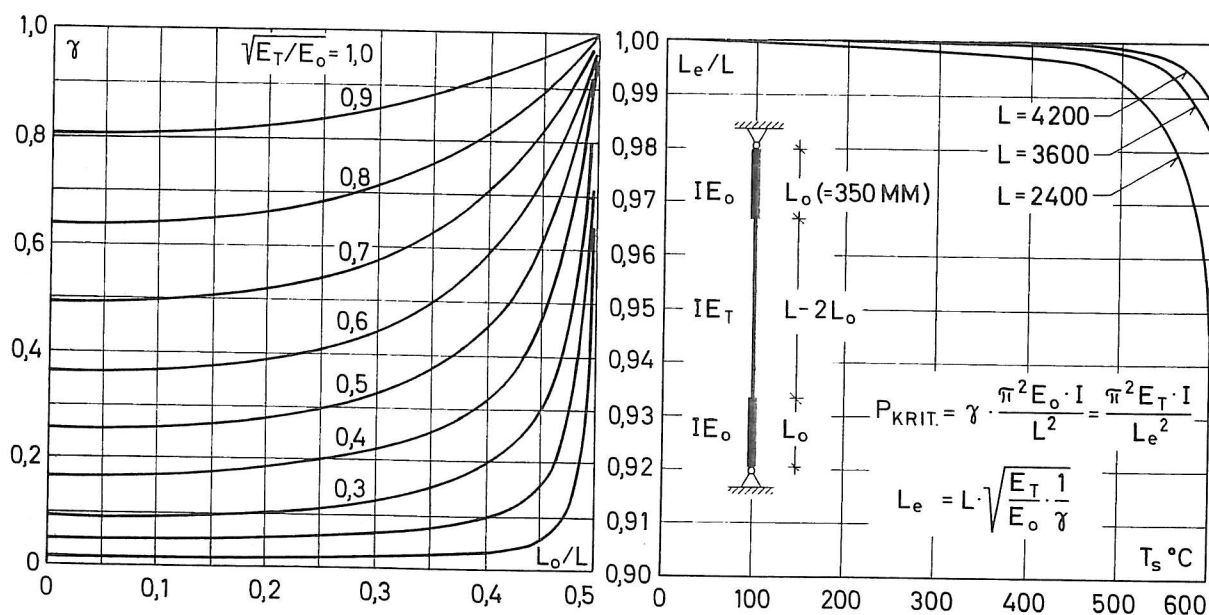
7. Ækvivalent søjlelængde

Som følge af, at en del af prøvelegemet rager ud gennem brandkammerets gavlvægge (300 mm i hver ende), vil søjlen på strækningen nærmest enderne have lavere temperatur og dermed større stivhed end den exponerede del inden i brandkammeret. Søjlen vil derfor ved prøvningen udvise større brud-

last end svarende til exponering over hele længden. For at kompensere herfor beregnes for hver enkelt prøvning en "ækvivalent søjlelængde" på følgende måde:

På grundlag af resultatet i figur 4 regnes ståltemperaturen konstant T_S over en strækning fra midte til midte af brandkammerets gavlvægge og konstant T_O ($= 20^\circ\text{C}$) over de udragende dele ($L_O = 350$ mm). Svarende hertil regnes søjlens stivhed konstant (IE_O) langs de udragende ender og konstant (IE_T) over den øvrige søjlestrækning. For en sådan søjle kan (under idealelastiske forudsætninger) knæklasten udtrykkes $P_{\text{krit.}} = \gamma \cdot \pi^2 E_O \cdot I / L^2$, hvor γ bestemmes af diagrammet til venstre (jvf. litt. [4]) for forskellige værdier af L_O/L og E_T/E_O . Defineres nu den ækvivalente søjlelængde som længden af den søjle, som - exponeret til T_S over hele sin længde - har samme knæklast som den aktuelle søjle af længden L med de uopvarmede endestrækninger, kan L_e/L bestemmes som angivet. For 3 værdier af L_O/L (svarende til $L_O = 350$ mm, $L = 2400$, 3600 og 4200 mm) er L_e/L bestemt for forskellige værdier af T_S og angivet på diagrammet til højre. Som E_T/E_O -relation er benyttet det i litt. [1] foreslåede.

Det ses, at først over 500°C har de "uopvarmede" endestrækninger nogen mærkbar indflydelse, men for fuldstændighedens skyld er søjlelængderne generelt korigeret i h.t. diagrammet, jvf. den samlede oversigt over forsøgsresultaterne i afsnit 10.

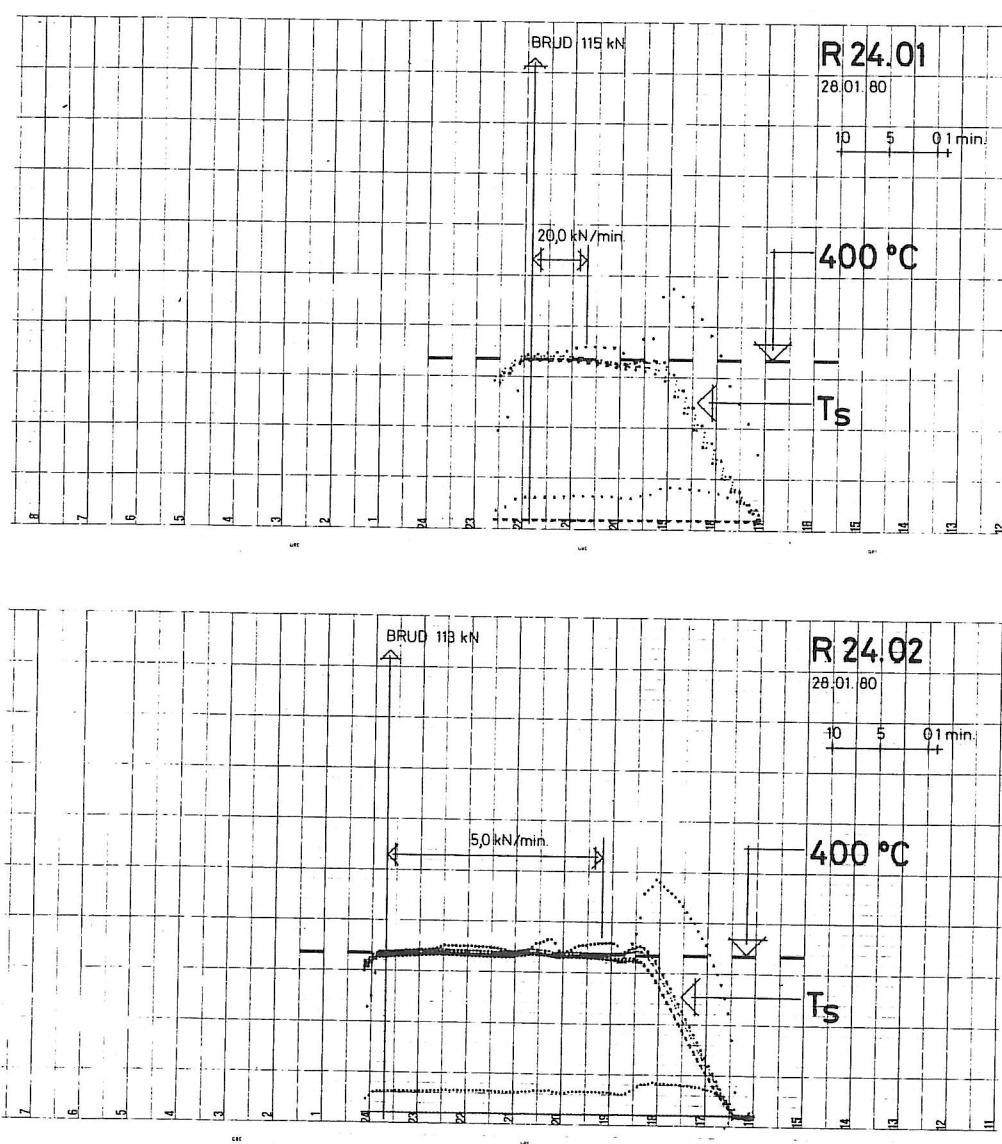


Figur 5. Beregningsdiagram til bestemmelse af den ækvivalente søjlelængde L_e , hvorved der kompenseres for, at de udragende dele af prøvelegemet har større stivhed end den exponerede del af prøvelegemet.

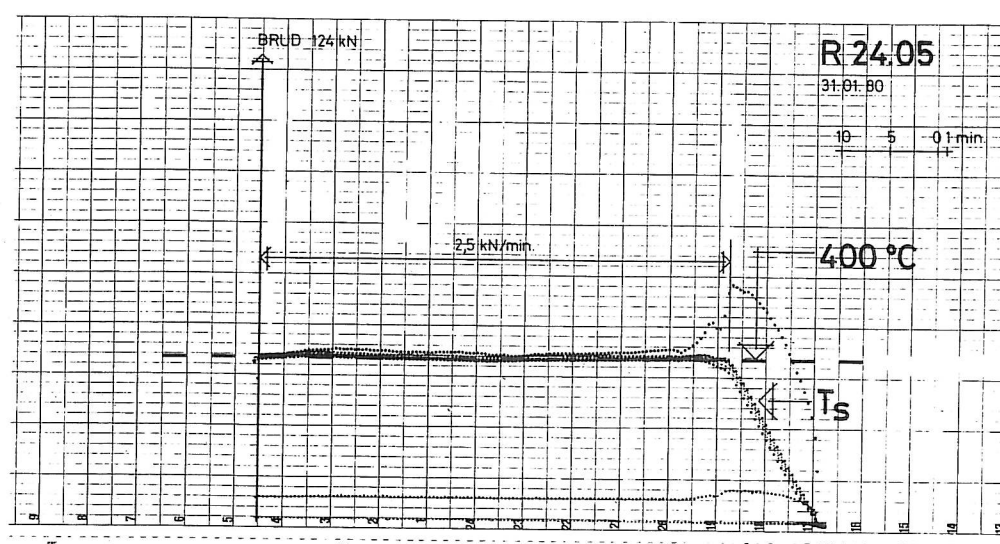
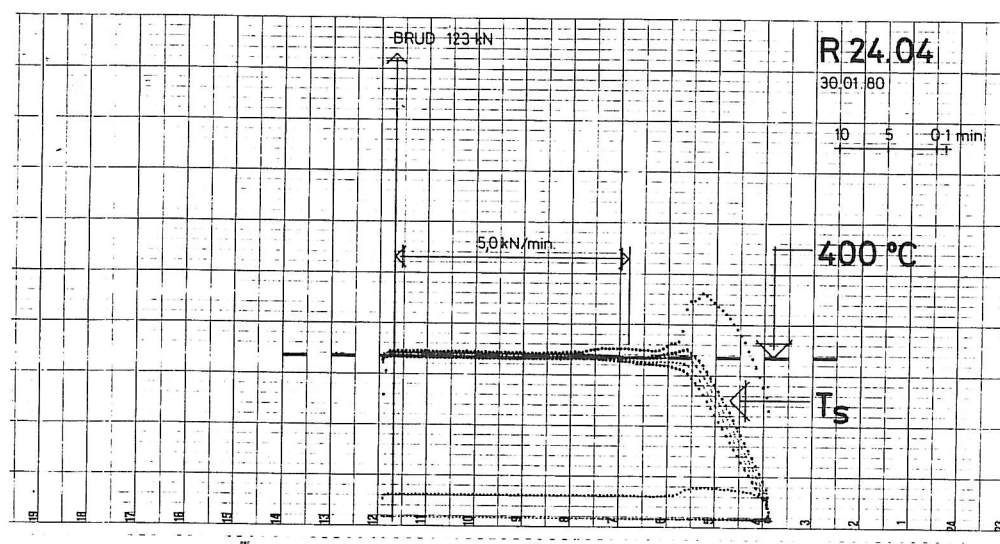
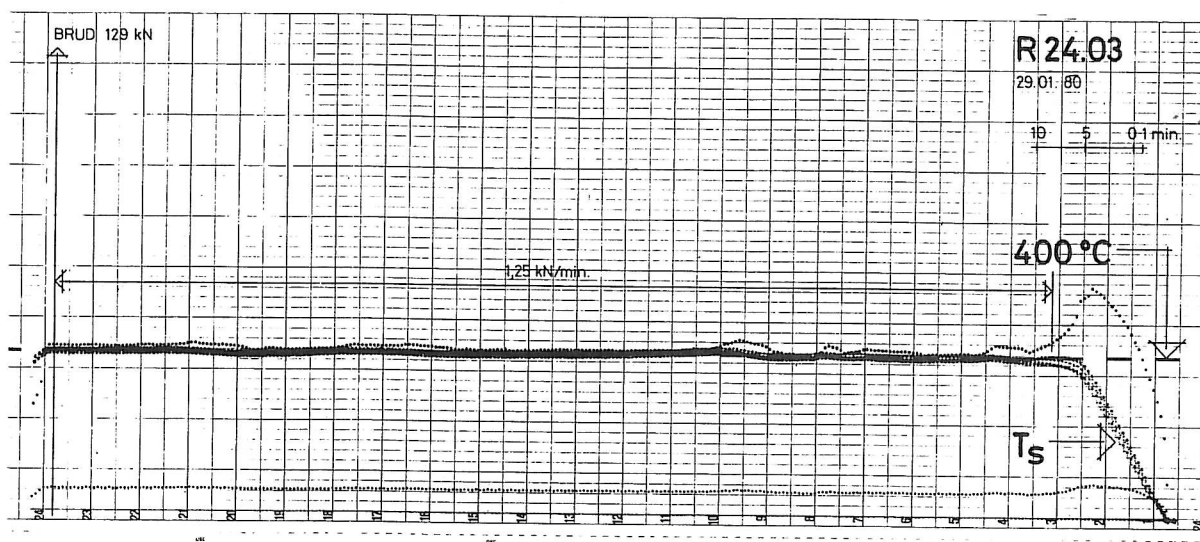
8. Belastningshastighed

For at vurdere belastningshastighedens indflydelse på knæklasten gennemførtes to serier pilotforsøg, hvor knæklasten for en serie RHS-profiler og en serie H-profiler opvarmet til henholdsvis 400°C og 550°C blev bestemt for forskellige belastningshastigheder. Resultaterne er vist på figurerne 6, 7 og 8. Det fremgår heraf, at korttidskrybningens indflydelse ved $T_s = 400^{\circ}\text{C}$ ikke er målelig (tværtimod udviser netop R 24.03, der belastedes langsomt, den største brudlast, hvilket må tilskrives andre forhold), medens der ved 550°C som forventet blev konstateret væsentlig lavere brudlast ved langsom end ved hurtig belastning.

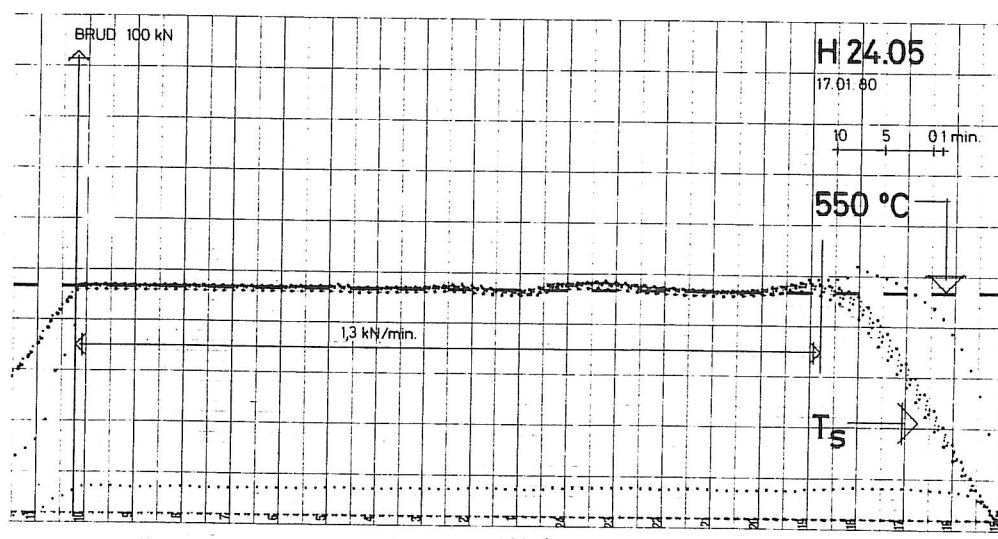
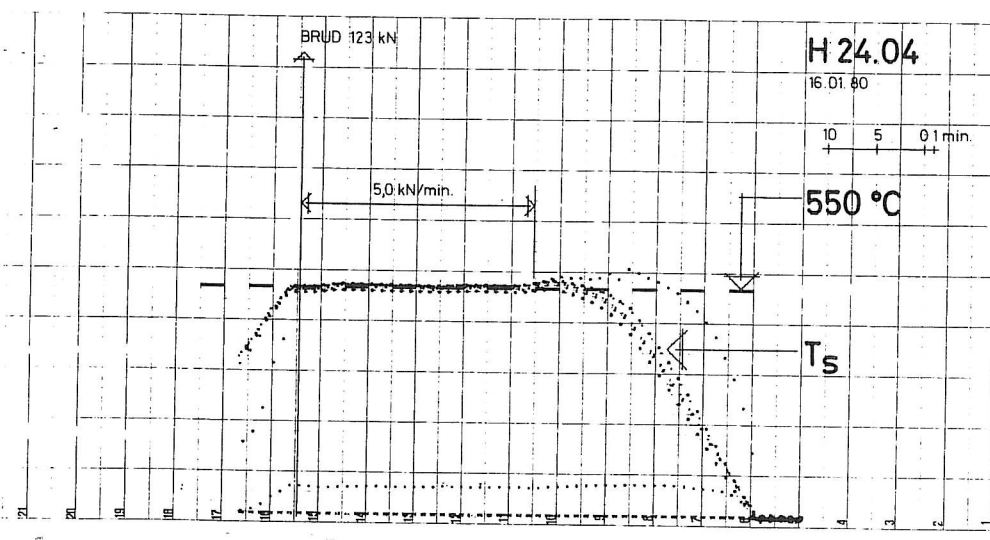
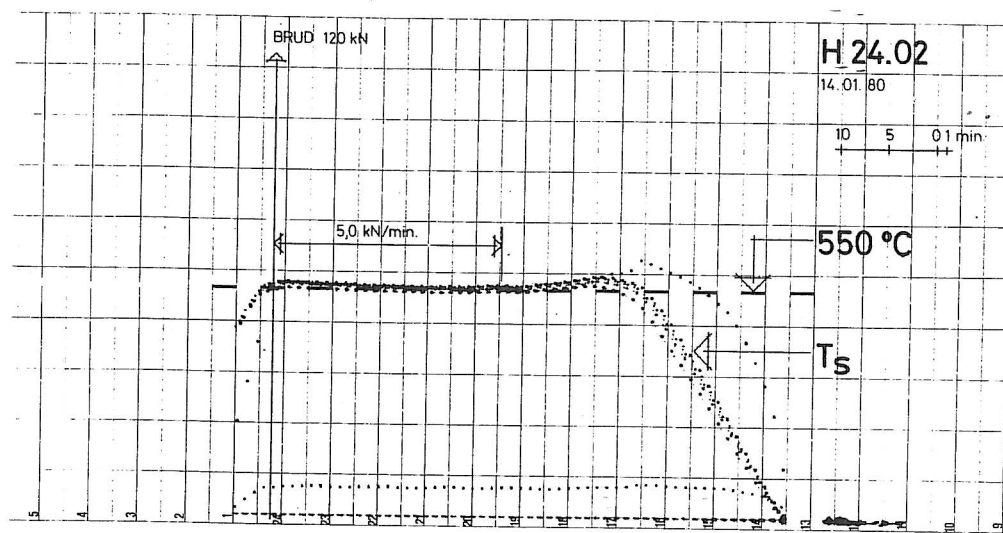
På grundlag heraf fastsattes, at belastningshastigheden ved forsøgene op til 400°C skulle afpasses således, at knækning kunne forventes i løbet af



Figur 6. Temperatur-udskrifter vedrørende prøvningerne R 24.01 og R 24.02.



Figur 7. Temperatur-udskrifter vedrørende prøvningerne R 24.03, R 24.04 og R 24.05.



Figur 8. Temperatur-udskrifter vedrørende prøvningerne H 24.02, H 24.04 og H 24.05.

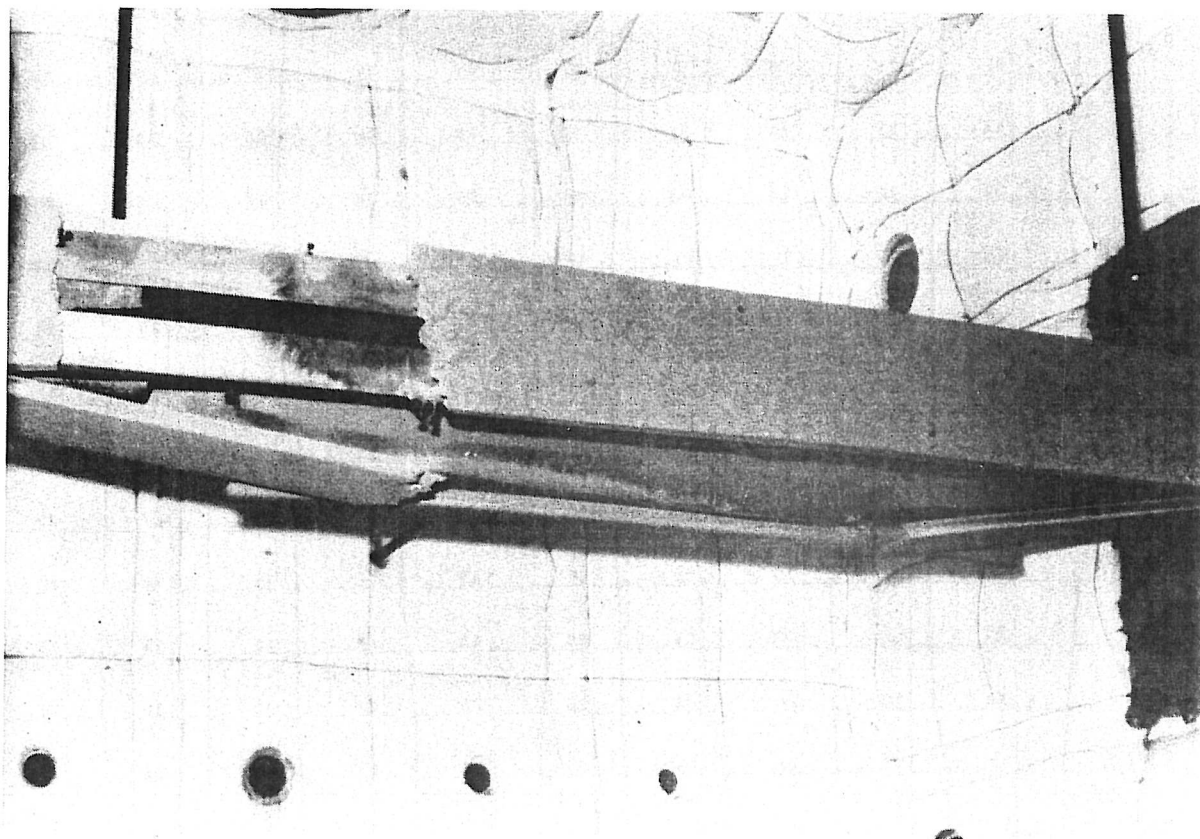
15 - 20 minutter, medens prøverne ved 550°C skulle belastes med en hastighed svarende til et forventet brud efter ca. 1 times opvarmning.

For samtlige forsøg blev lasten påført ganske jævnt i spring á 1 - 2 kN med de på temperaturudskrifterne anførte hastigheder, se figurerne 13 - 20.

9. Forsøgsresultater

Som det fremgår af det foregående, er samtlige forsøg udført med uisolerede prøvelegemer - med prøve H 24.10 som eneste undtagelse. Det var oprindelig meningen, at 1 prøve i hver af de 6 serier skulle udføres med isoleret prøvelegeme exponeret i h.t. det standardiserede brandforløb ISO 834 og forhåndsbelastet med en last svarende til den forventede brudlast ved 400°C .

Prøve H 24.10 blev gennemført efter denne plan med en brandisolering af 20 mm Navilite-plader befæstet på monteringsskinner. Prøven faldt imidlertid uheldigt ud, idet befæstelsen af isoleringen begyndte at svigte efter 35 minutters påvirkning (se figur 14), hvorefter ståltemperaturen steg hastigt, således at brud indtraf efter 48 minutters påvirkning. På dette tidspunkt var temperaturen så uensartet over tværsnittet ($500 - 570^{\circ}\text{C}$), at det



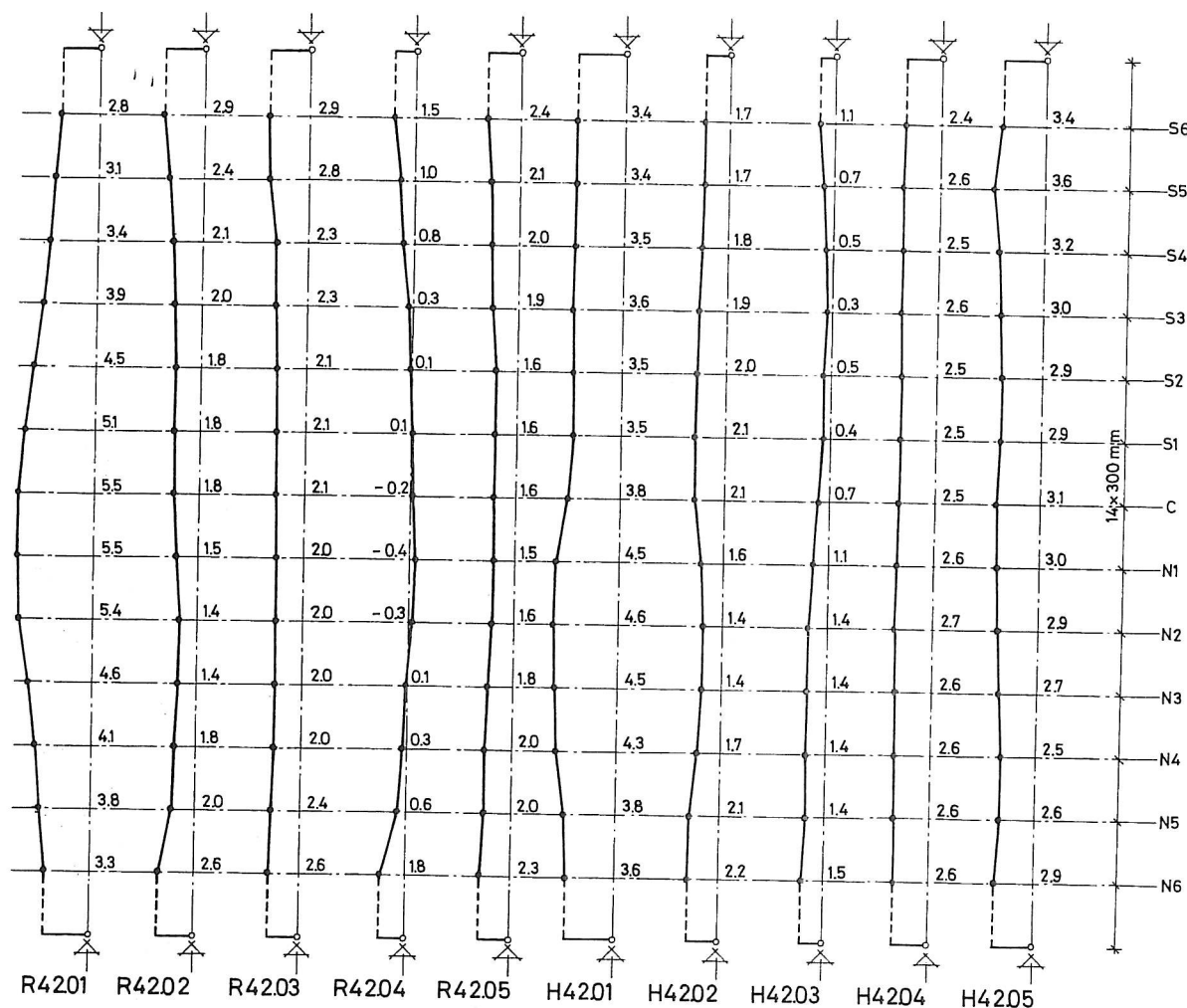
Figur 9. Prøve H 24.10 efter brandprøvning. Prøvelegemet var isoleret med 20 mm Navilite-plader og blev exponeret i h.t. ISO 834. Belastning 243 kN. Efter 35 minutters påvirkning indtrådte begyndende svigt i isoleringens befæstelse, og søjlens brud indtraf efter 48 minutters påvirkning.

er vanskeligt at definere, hvad "ståltemperaturen" var på brudtidspunktet.

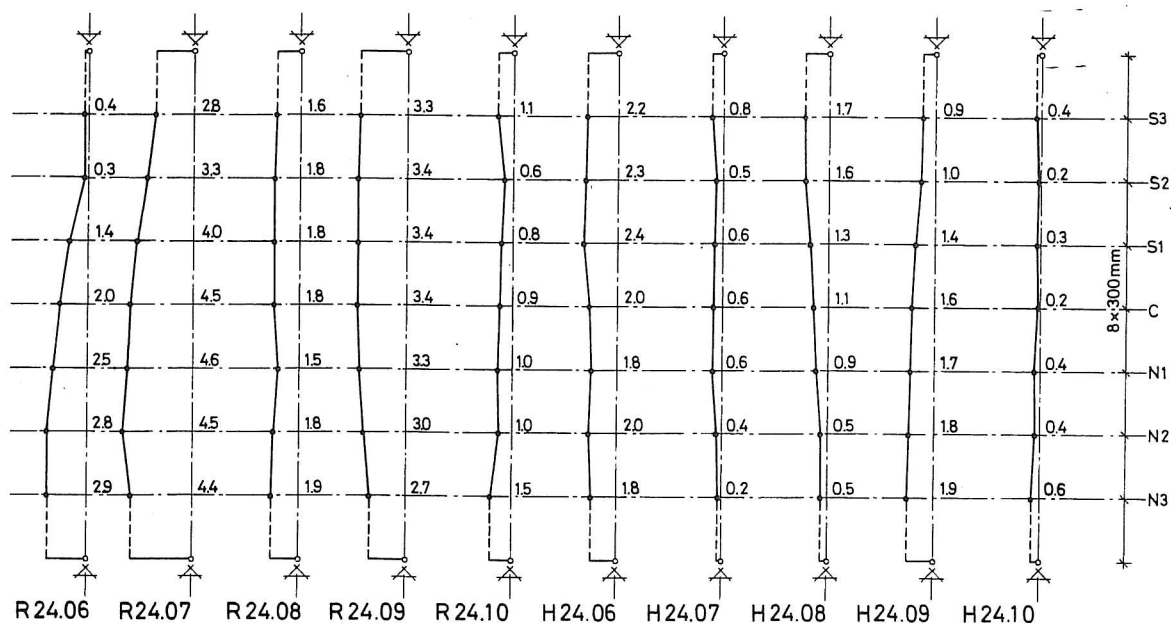
Da prøvningens resultat således vanskeligt kan udnyttes til forsøgsseriens formål, besluttedes det at udføre de efterfølgende tilsvarende prøvninger med uisolerede prøvelegemer med en opvarmningshastighed svarende til forventet brud efter ca. 1 times belastning.

De geometriske opmålingers data i skema I (side 9) er bearbejdet til bestemmelse af de enkelte prøvelegemers faktiske tværsnitsareal A og inertimoment om den "svage" akse I_{\min} . Som en brugelig tilnærmelse er tværsnitskonstanterne beregnet ud fra middeltal mellem de målte dimensioner i prøvelegemets to ender. De således beregnede værdier af A og $I_{\min}/1000$ er afrundet til hele multipla af 10 (mm^2 hhv. mm^4) og indført i oversigtsskemaet figur 22. Det ses, at H-profilernes tværsnitsareal varierer betydeligt ($2130 - 2240 \text{ mm}^2$), medens RHS-profilernes variation er ubetydelig.

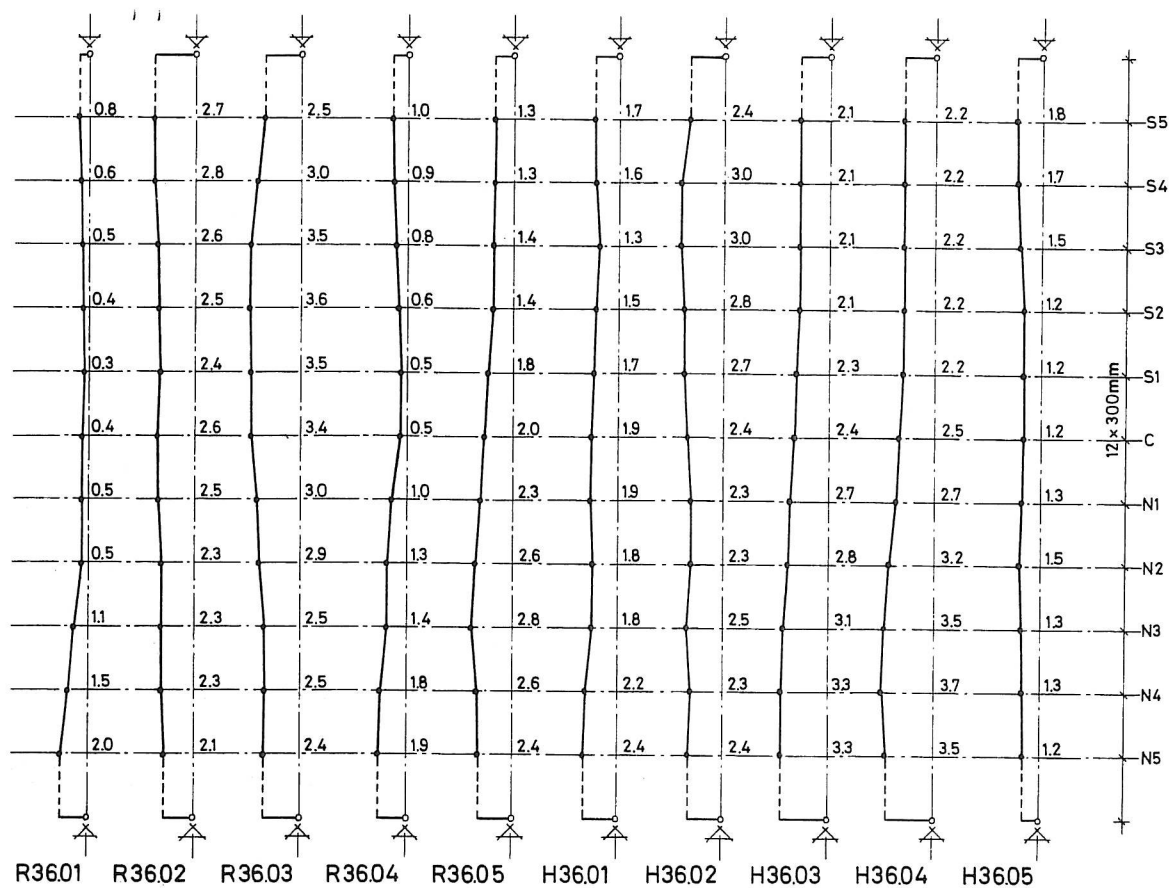
Ud fra de i skema II (side 9) anførte data er for hvert enkelt prøvelegeme beregnet koordinaterne til tværsnittets tyngdepunkt i snit med 300 mm



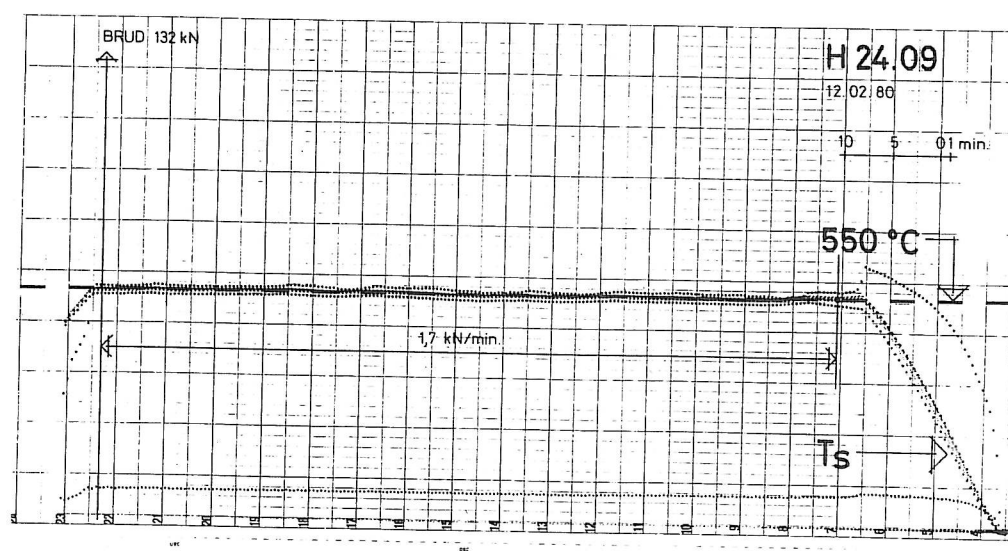
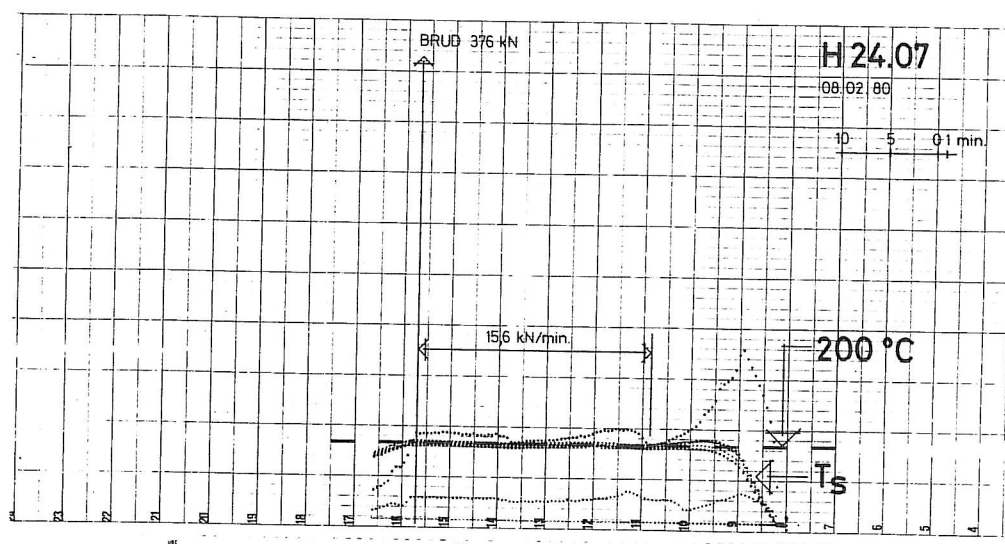
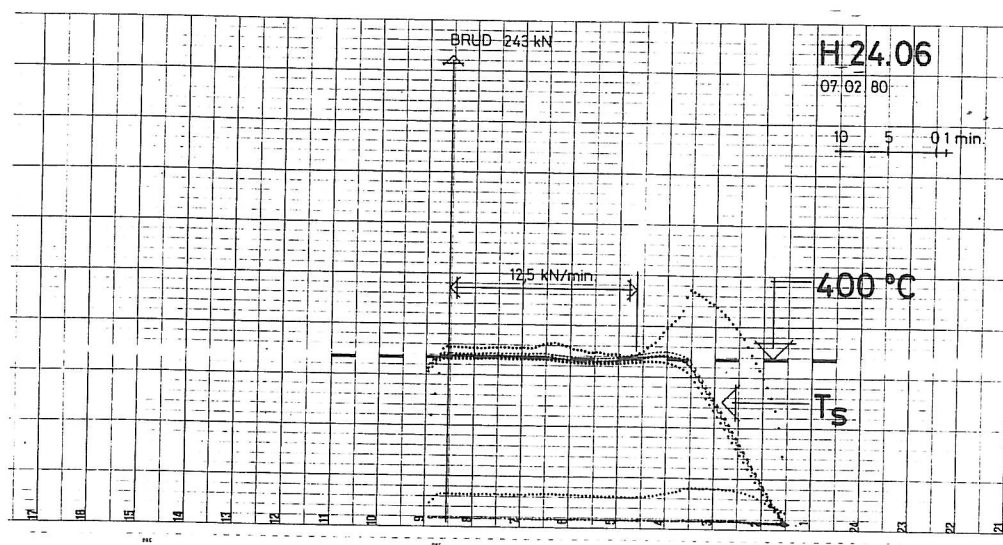
Figur 10. Beregnede excentriciteter (tyngdepunktets X-koordinater) for serie R 42 og H 42. Mål angivet i mm og afsat 2:1.



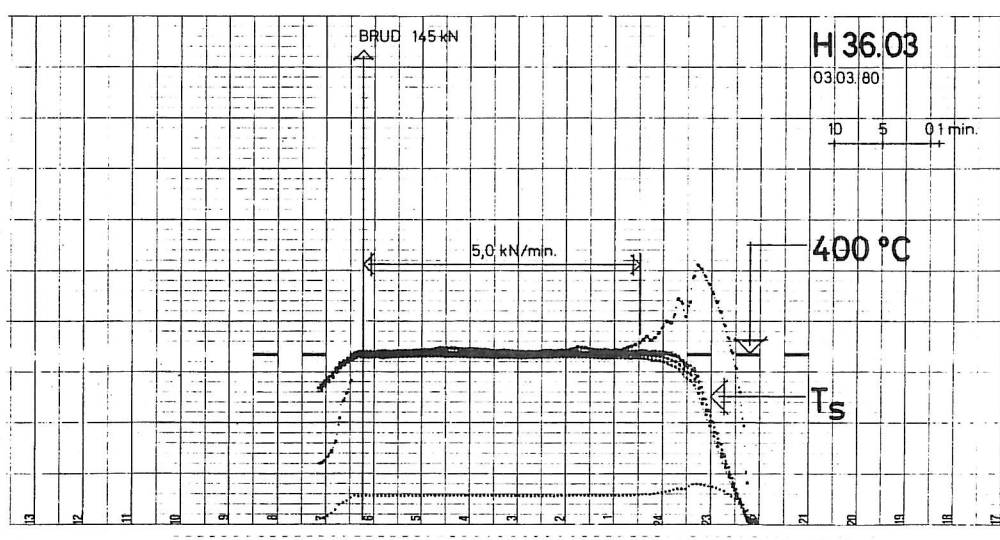
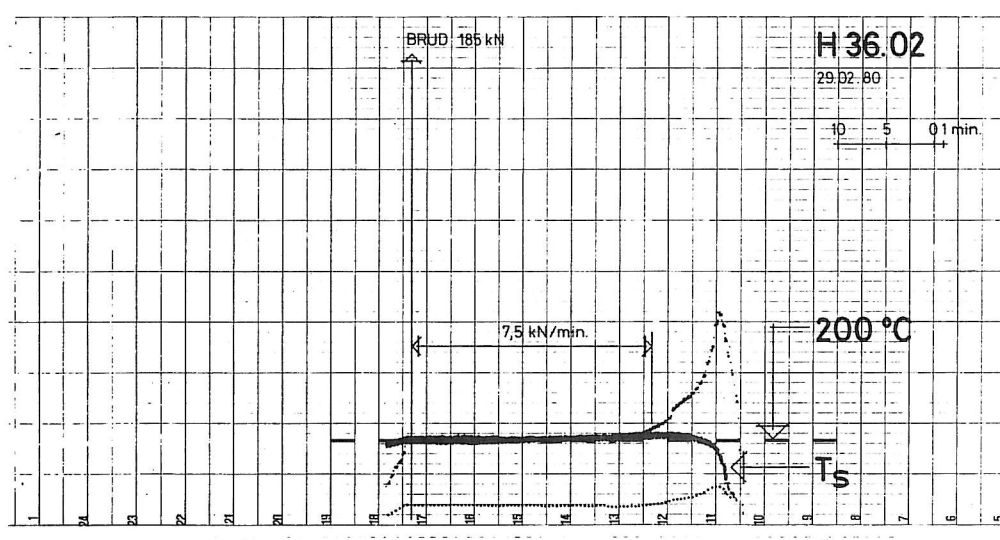
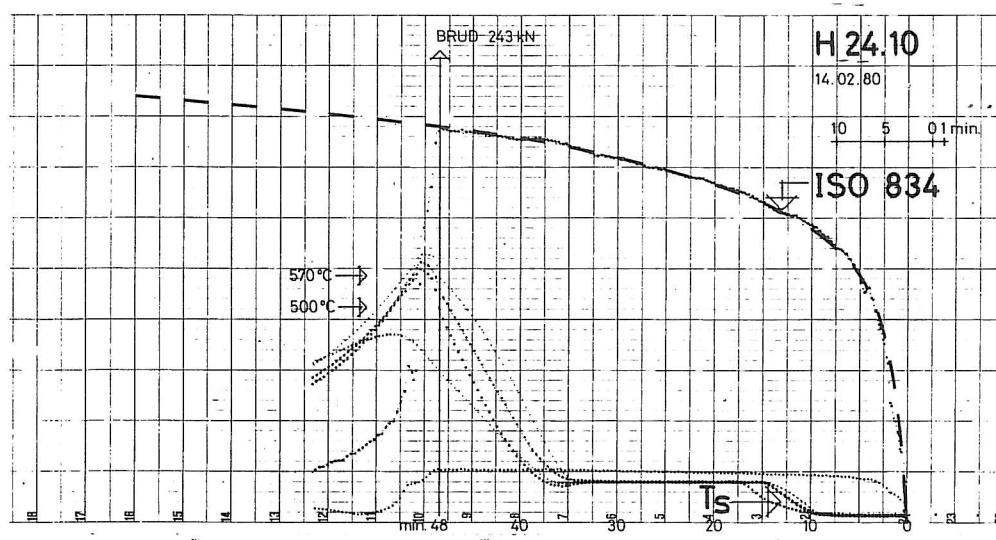
Figur 11. Beregnede excentriciteter (tyngdepunktets X-koordinater) for serie R 24 og H 24. Mål angivet i mm og afsat ca. 2:1.



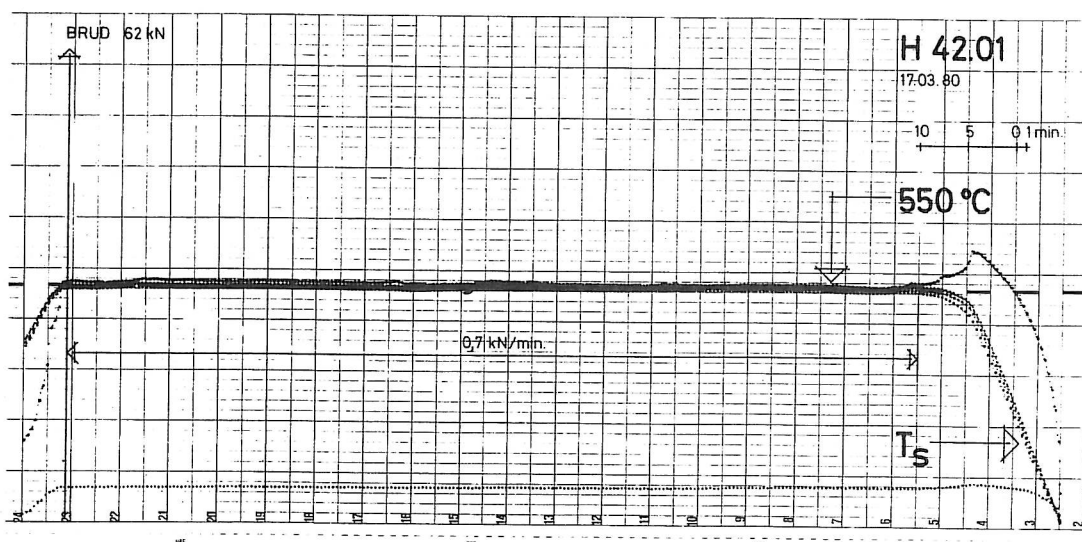
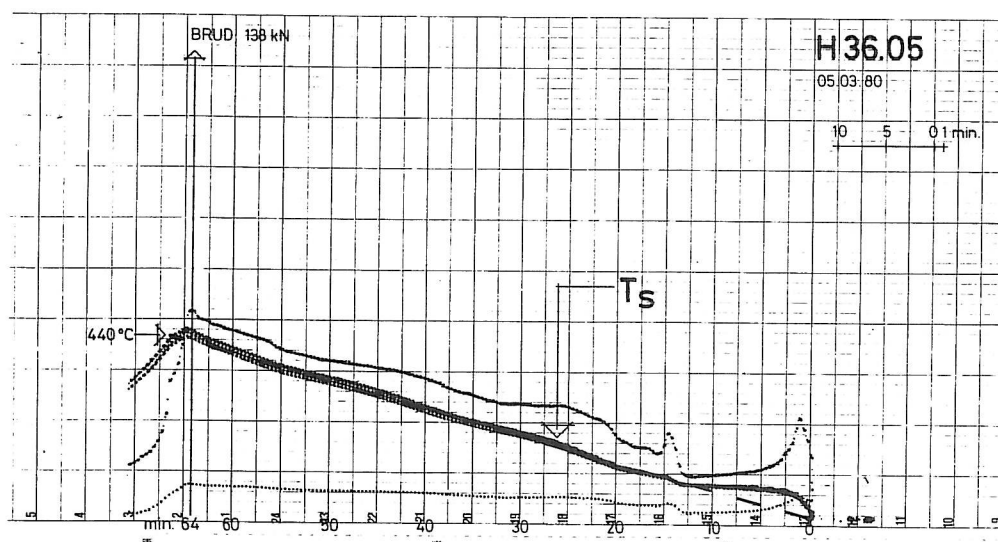
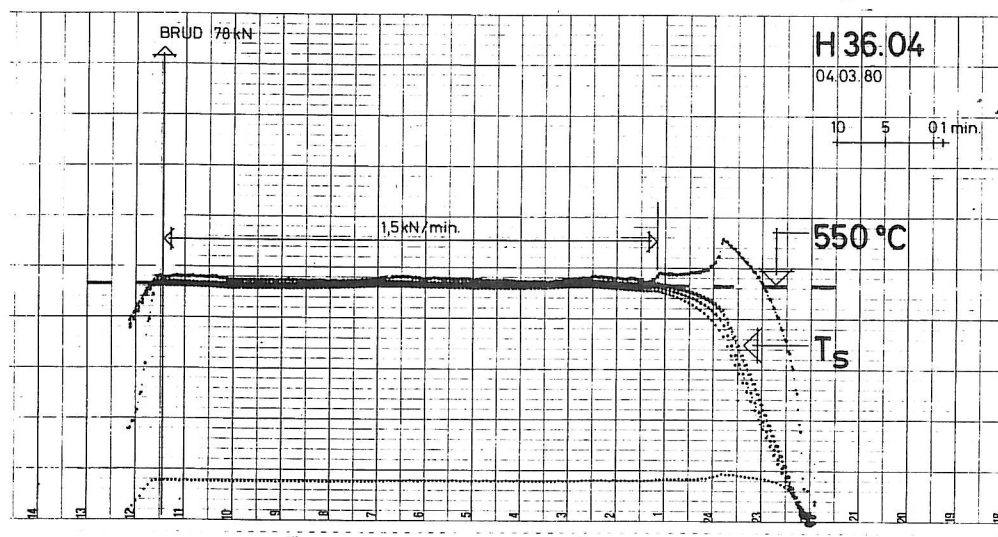
Figur 12. Beregnede excentriciteter (tyngdepunktets X-koordinater) for serie R 36 og H 36. Mål angivet i mm og afsat ca. 2:1.



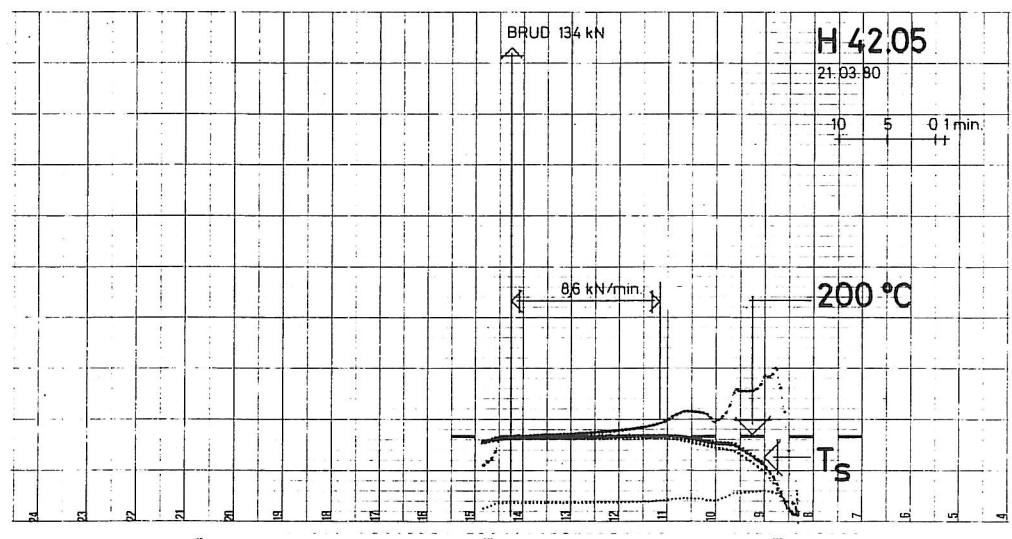
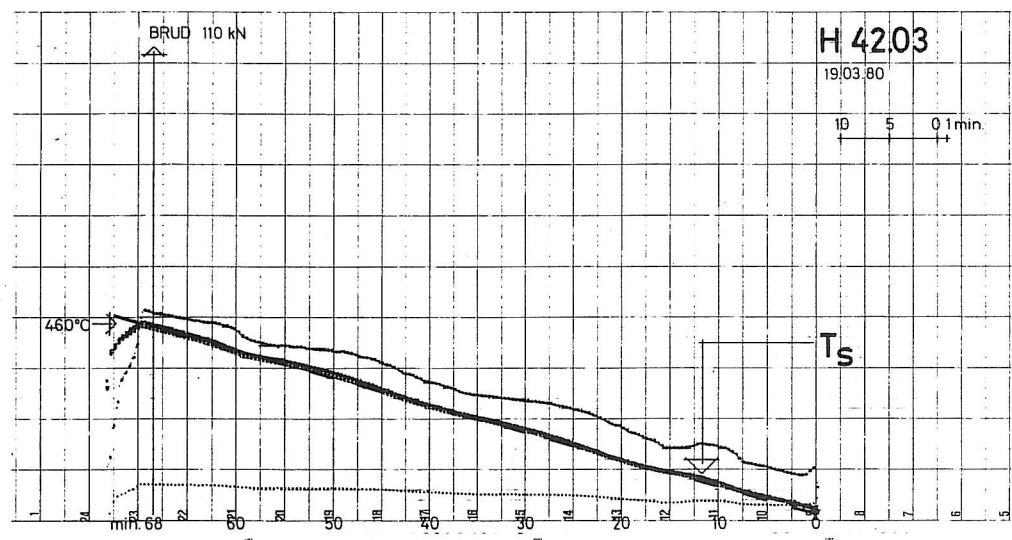
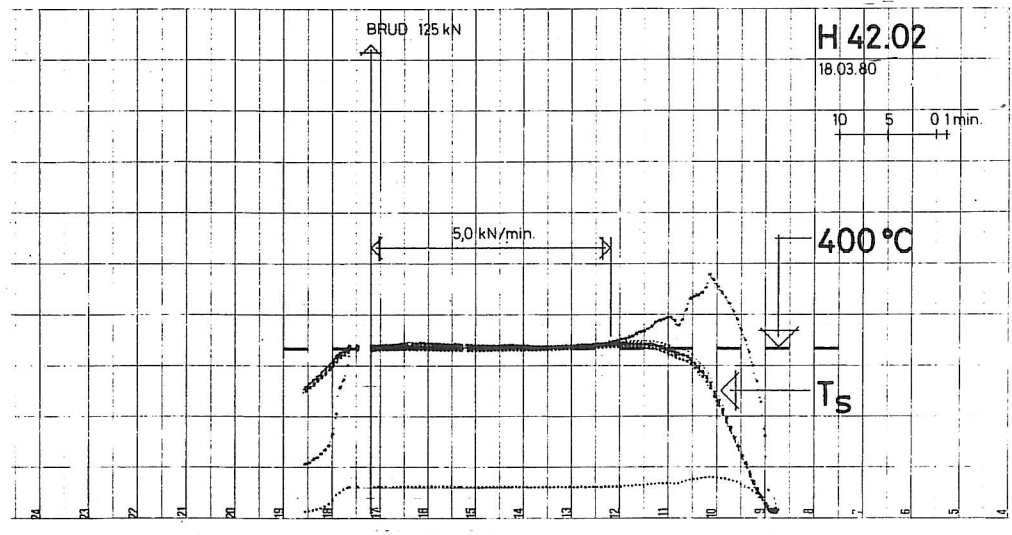
Figur 13. Temperatur-udskrifter vedrørende prøvningerne H 24.06, H 24.07 og H 24.09.



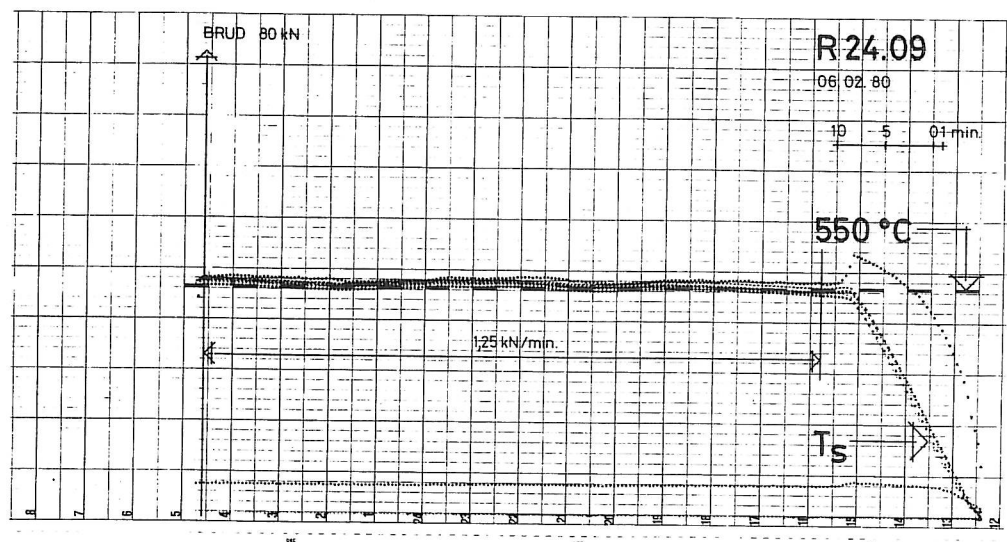
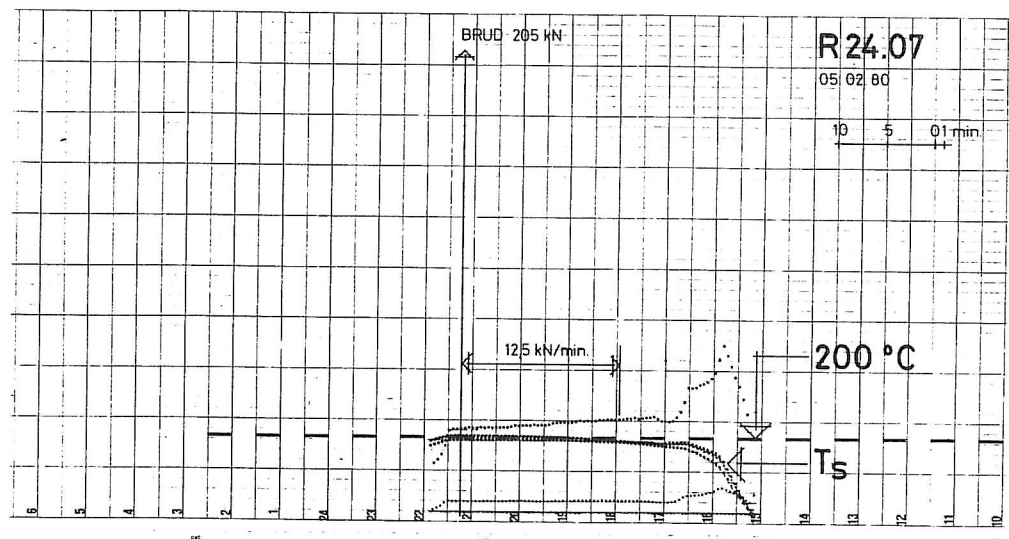
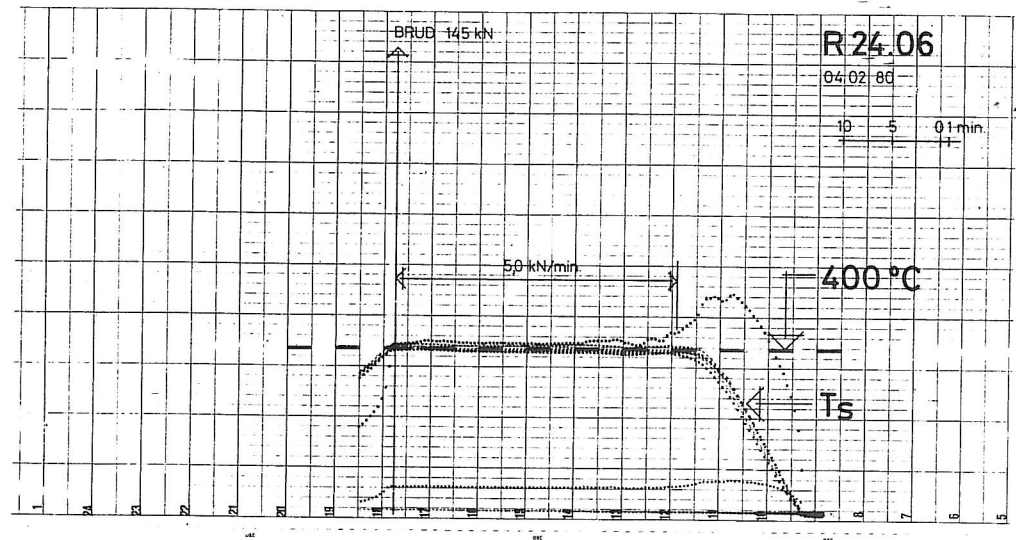
Figur 14. Temperatur-udskrifter vedrørende prøvningerne H 24.10, H 36.02 og 36.03.



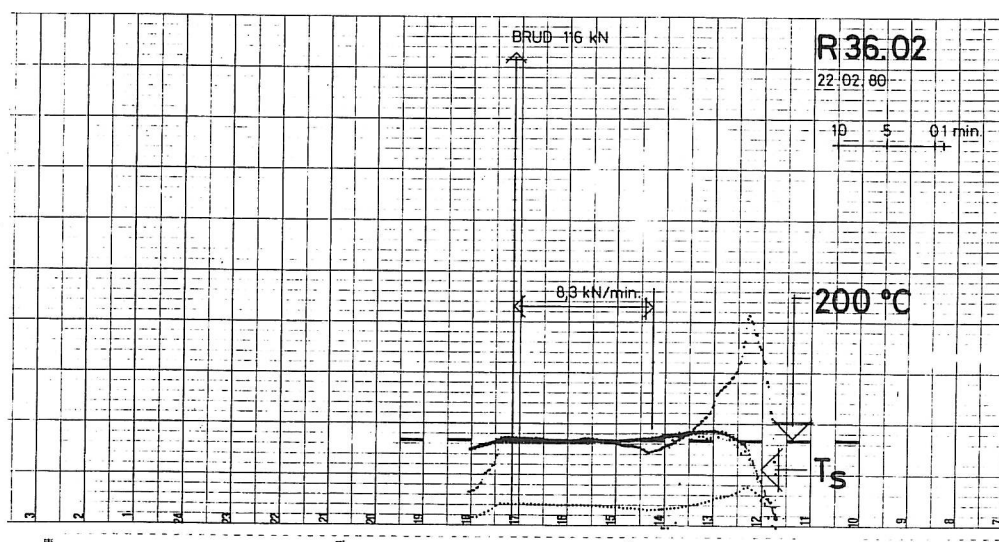
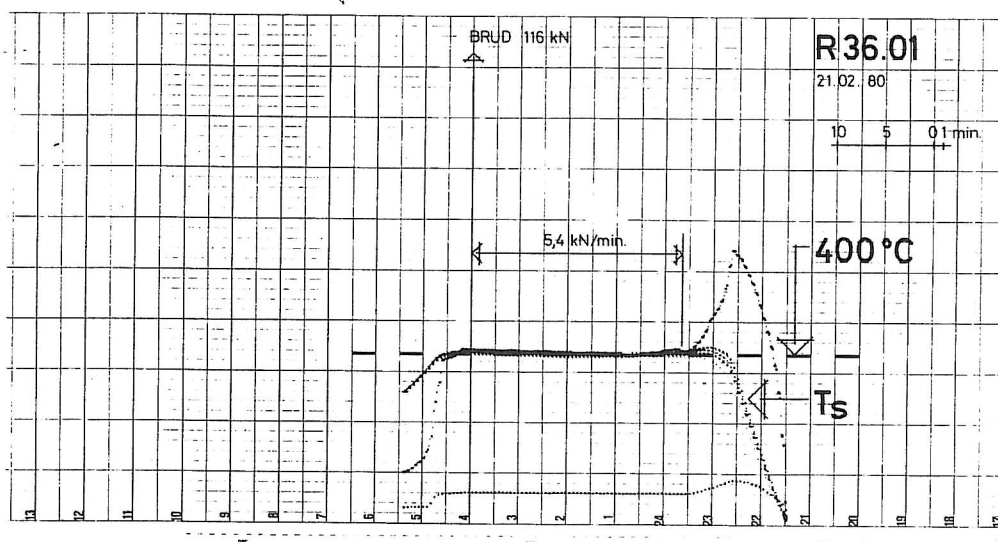
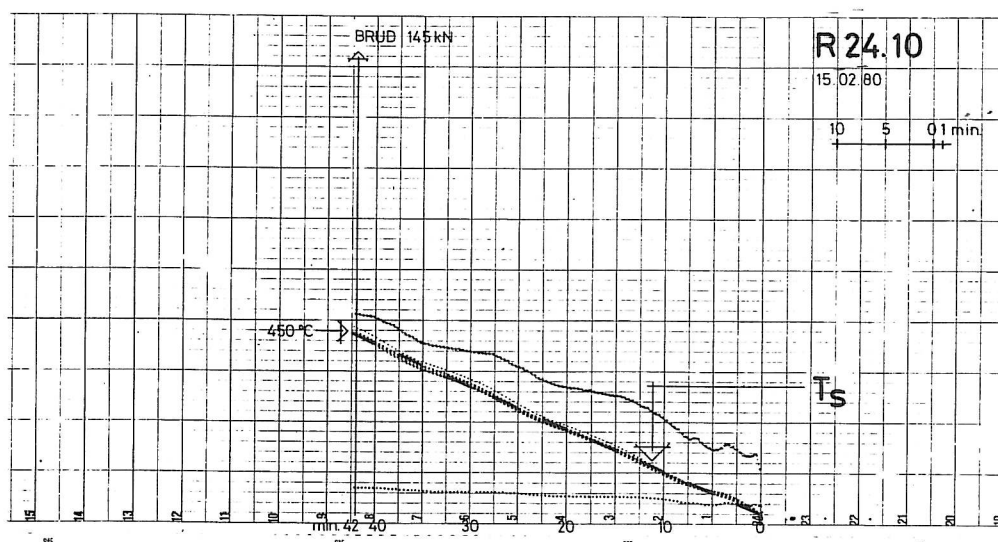
Figur 15. Temperatur-udskrifter vedrørende prøvningerne H 36.04, H 36.05 og H 42.01.



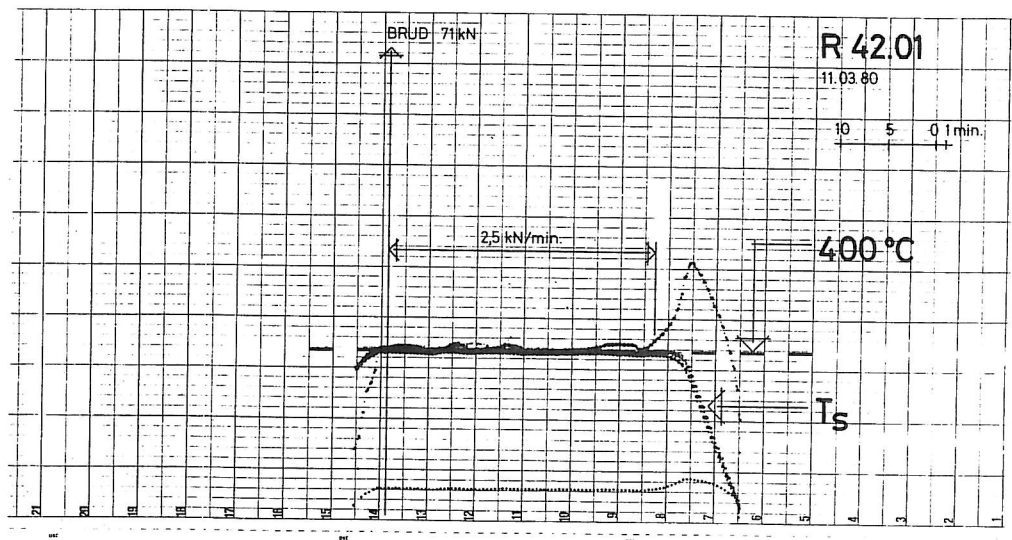
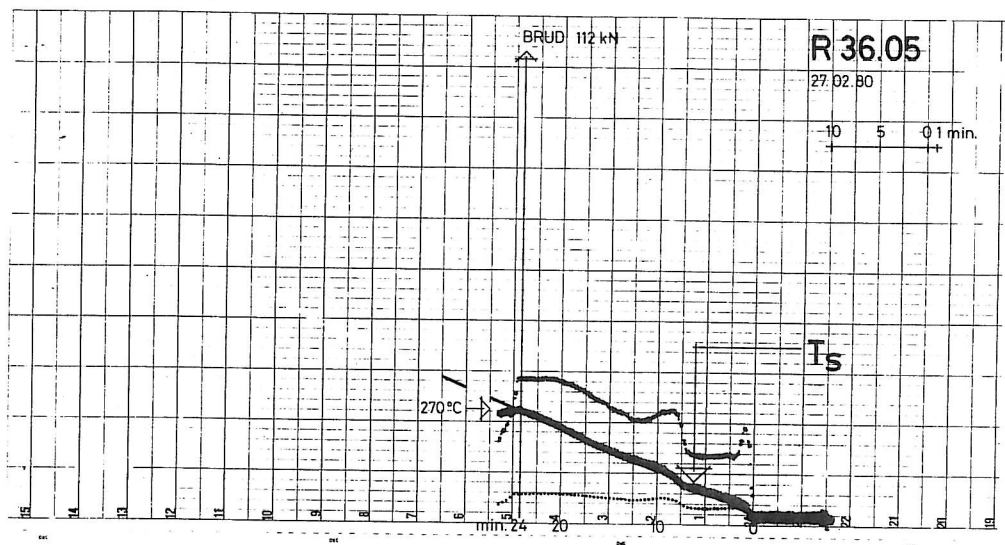
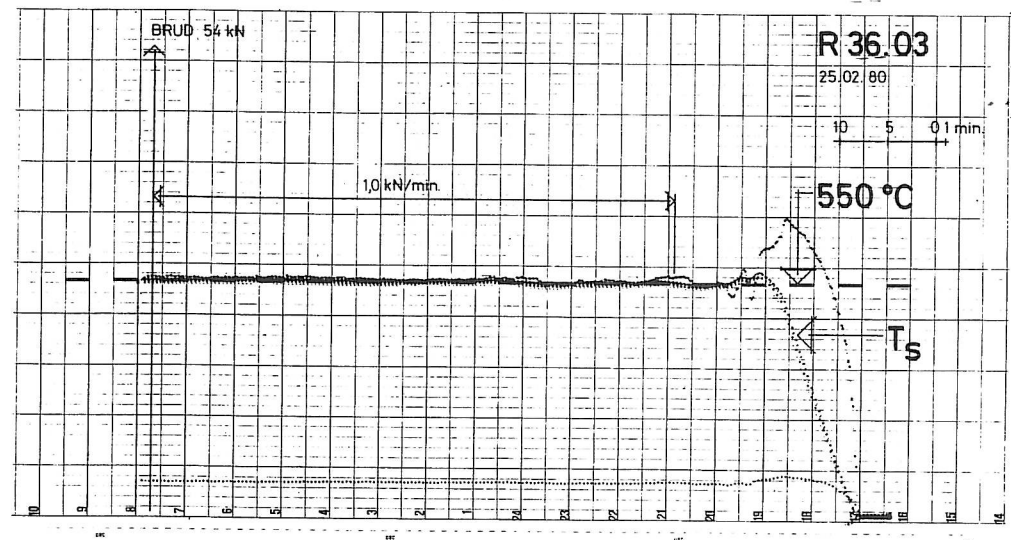
Figur 16. Temperatur-udskrifter vedrørende prøvningerne H 42.02, H 42.03 og H 42.05.



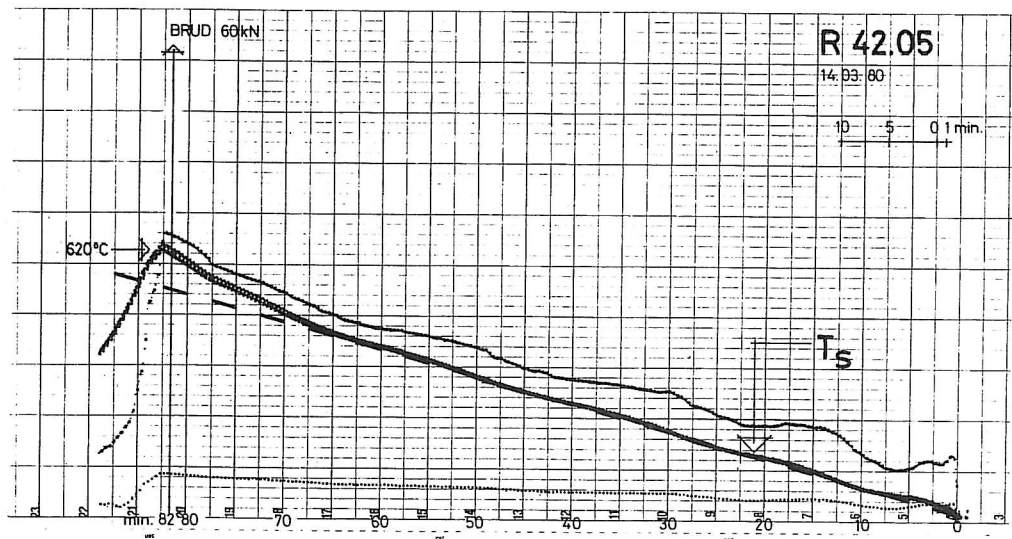
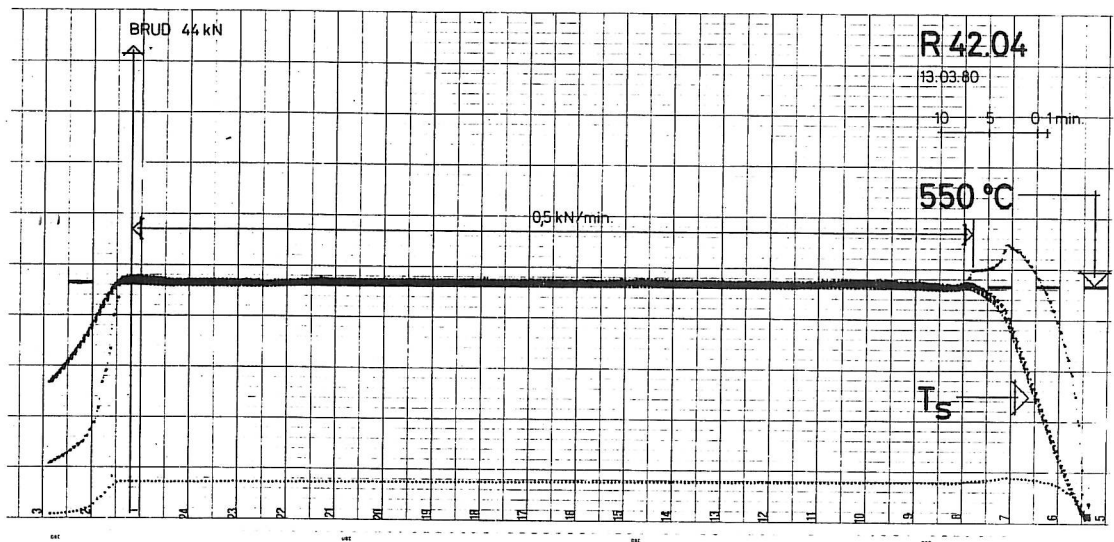
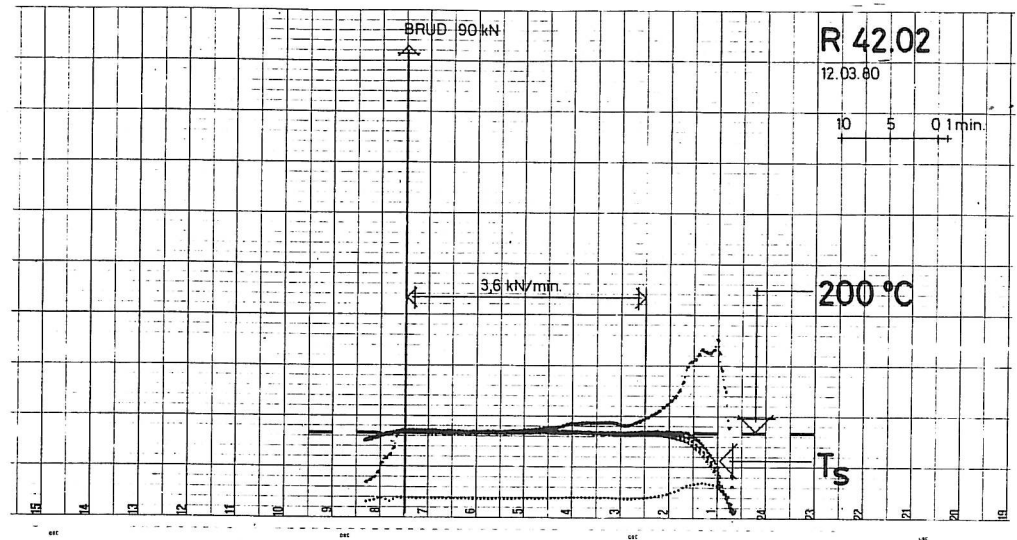
Figur 17. Temperatur-udskrifter vedrørende prøvningerne R 24.06, R 24.07 og R 24.09.



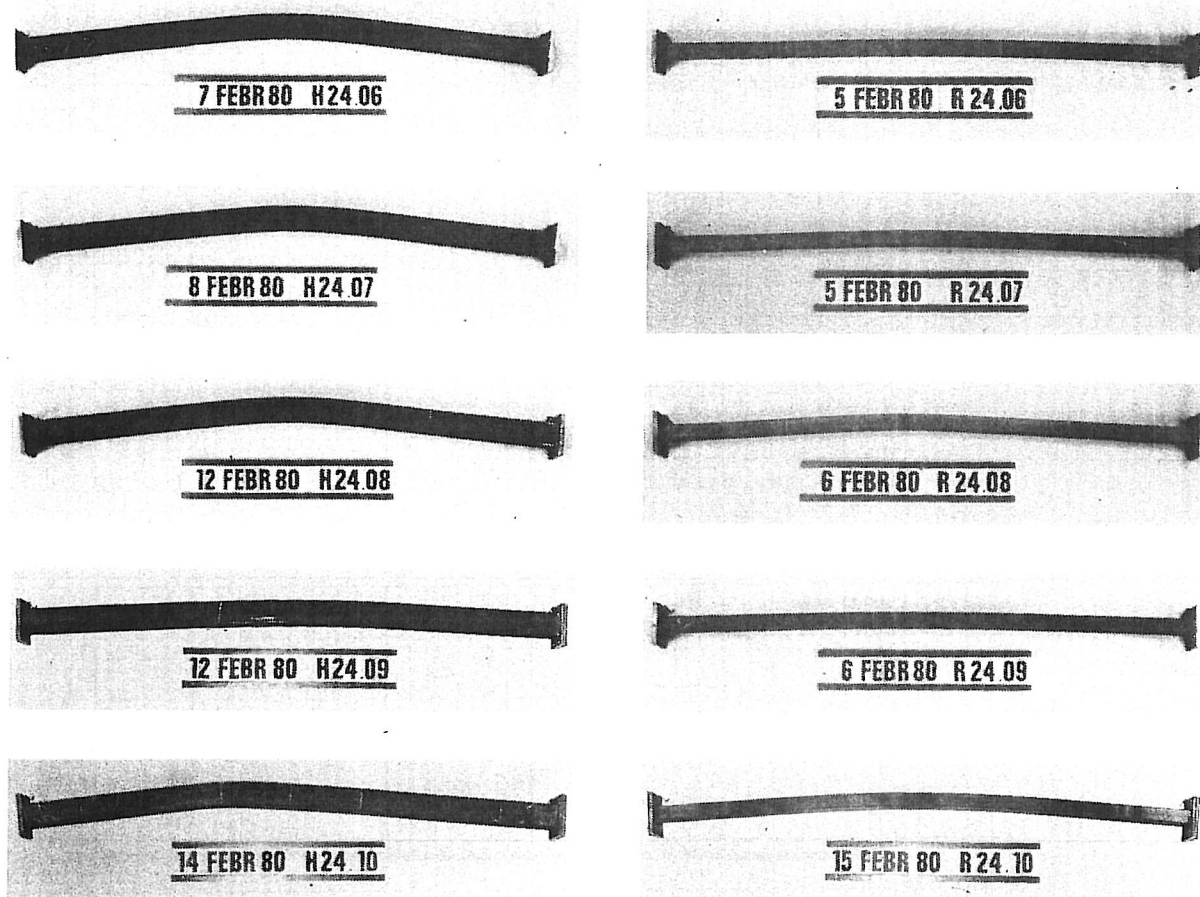
Figur 18. Temperatur-udskrifter vedrørende prøvningerne R 24.10, R 36.01 og R 36.02.



Figur 19. Temperatur-udskrifter vedrørende prøvningerne R 36.03, R 36.05 og R 42.01.



Figur 20. Temperatur-udskrifter vedrørende prøvningerne R 42.02, R 42.04 og R 42.05.



Figur 21. Prøvelegemerne i serie H 24 og R 24 fotograferet efter brandprøvningerne. Tilsvarende fotos foreligger for samtlige prøvelegemer i forsøgsrækken.

afstand (C, S1 - S6 og N1 - N6). På figurerne 10 - 12 er grafisk vist variationen af tyngdepunktets X-koordinat angivet i mm med 1 decimal. Ved anvendelsen af disse resultater kan søjlekraften regnes introduceret med en afvigelse fra $X = 0$ på maksimalt 1.0 mm.

Brandprøvningernes resultat fremgår af foranstående figurer 13 - 20, hvor der for hver enkelt prøvning (excl. prøvningerne ved 20°C) på det originale temperaturudskriftsblad er indskrevet supplerende oplysninger om brudlast, belastningshastighed, brudtemperatur, prøvningsdato m.v.

Efter prøvningerne er hvert enkelt prøvelegeme fotograferet. For serierne R 24 og H 24 er de optagne fotos gengivet på figur 21.

10. Sammenfatning og konklusion

På figur 22 er givet en sammenfattende oversigt over de væsentligste forsøgsresultater. På grundlag af de aktuelle målte og beregnede tværsnitskon-

| Prøve nr. | T _{brud} °C | A mm ² | $\frac{I_{min}}{1000}$ mm ⁴ | i _{min} mm | L _e mm | $\frac{L_e}{i_{min}}$ | $\frac{d\sigma}{dt}$ MPa minut | P _{brud} kN | σ_{brud} MPa |
|--------------|-------------------------|----------------------|---|------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| H 24.06 | 400 | 2240 | 1420 | 25,2 | 2390 | 95 | 5,6 | 243 | 108 |
| H 24.07 | 200 | 2160 | 1370 | 25,2 | 2395 | 95 | 7,2 | 376 | 174 |
| H 24.08 | 20 | 2230 | 1410 | 25,2 | 2400 | 95 | 22,4 | 420 | 188 |
| H 24.09 | 550 | 2230 | 1420 | 25,2 | 2360 | 94 | 0,8 | 132 | 59 |
| H 24.10 | 500/570 | 2180 | 1380 | 25,1 | 2370 | 95 | - | 243 | 111 |
| H 36.01 | 20 | 2140 | 1360 | 25,2 | 3600 | 143 | 5,8 | 198 | 93 |
| H 36.02 | 200 | 2160 | 1350 | 25,0 | 3600 | 144 | 3,5 | 185 | 86 |
| H 36.03 | 400 | 2130 | 1340 | 25,1 | 3595 | 143 | 2,3 | 145 | 68 |
| H 36.04 | 550 | 2150 | 1360 | 25,1 | 3580 | 143 | 0,7 | 78 | 36 |
| H 36.05 | 440 | 2170 | 1380 | 25,2 | 3595 | 143 | - | 138 | 64 |
| H 42.01 | 550 | 2130 | 1340 | 25,1 | 4185 | 167 | 0,3 | 62 | 29 |
| H 42.02 | 400 | 2170 | 1380 | 25,3 | 4200 | 166 | 2,3 | 125 | 58 |
| H 42.03 | 460 | 2190 | 1400 | 25,3 | 4195 | 166 | - | 110 | 50 |
| H 42.04 | 20 | 2130 | 1340 | 25,1 | 4200 | 167 | 3,5 | 149 | 70 |
| H 42.05 | 200 | 2190 | 1390 | 25,2 | 4200 | 167 | 3,9 | 134 | 61 |
| R 24.06 | 400 | 1490 | 850 | 23,9 | 2390 | 100 | 3,4 | 145 | 97 |
| R 24.07 | 200 | 1490 | 850 | 23,9 | 2395 | 100 | 8,4 | 205 | 138 |
| R 24.08 | 20 | 1490 | 850 | 23,9 | 2400 | 100 | 8,4 | 259 | 174 |
| R 24.09 | 550 | 1490 | 850 | 23,9 | 2360 | 99 | 0,8 | 80 | 54 |
| R 24.10 | 450 | 1510 | 880 | 24,1 | 2385 | 99 | - | 145 | 96 |
| R 36.01 | 400 | 1500 | 860 | 23,9 | 3595 | 150 | 3,6 | 116 | 77 |
| R 36.02 | 200 | 1500 | 850 | 23,9 | 3600 | 151 | 5,5 | 116 | 77 |
| R 36.03 | 550 | 1480 | 850 | 23,9 | 3580 | 150 | 0,7 | 54 | 36 |
| R 36.04 | 20 | 1490 | 850 | 23,9 | 3600 | 151 | 7,4 | 131 | 88 |
| R 36.05 | 270 | 1480 | 850 | 23,9 | 3600 | 151 | - | 112 | 76 |
| R 42.01 | 400 | 1490 | 850 | 23,9 | 4200 | 176 | 1,8 | 71 | 48 |
| R 42.02 | 200 | 1490 | 850 | 23,9 | 4200 | 176 | 2,4 | 90 | 60 |
| R 42.03 | 20 | 1490 | 850 | 23,9 | 4200 | 176 | 2,4 | 95 | 64 |
| R 42.04 | 550 | 1480 | 850 | 23,9 | 4185 | 175 | 0,3 | 44 | 30 |
| R 42.05 | 620 | 1500 | 860 | 23,9 | 4000 | 167 | - | 60 | 40 |

Figur 22. Samlet oversigt over forsøgsresultater.

stanter og de beregnede ækvivalente søjlelængder er for hver enkelt prøvning angivet søjlens slankhedstal L_e/i_{\min} .

Endvidere er angivet de beregnede spændingshastigheder $d\sigma/dt$, brudtemperatur og brudlast, og endelig er angivet en formel brudspænding, beregnet som $\sigma_{\text{brud}} = P_{\text{brud}}/A$. Det understreges, at denne gennemsnitlige "brudspænding" er af rent formel karakter, da den ikke siger noget om, hvad den faktiske maksimale spænding har været i udknækningsøjeblikket. Dette understreges iøvrigt af, at de enkelte prøvninger udviste blivende deformationer af vidt forskellig størrelse (fra ca. 30 mm til ca. 150 mm pilhøjde).

Netop dette sidste peger i retning af, at fortsatte forsøg af tilsvarende art vil vinde betydeligt i videnskabelig værdi, hvis prøvningsarrangementet suppleres med måleanordninger til løbende registrering af deformationsforløbet under prøvningen.

I relation til de i afsnit 2 opstillede formål med forsøgsrækken kan det foreløbig konkluderes,

- at måleprogrammet - med henblik på verifikation af en beregningsmodel for stålsøjlers udknækning ved høje temperaturer - bør suppleres med registrering af deformationsforløbet,
- at der er tilvejebragt et rimeligt repræsentativt forsøgsgrundlag til vurdering af de i afsnit 2 nævnte forenklede beregningsmetoder,
- at prøvningsudstyret har vist sig effektivt og velegnet til hurtig afvikling af en større prøvningsopgave, som med hensyn til prøvedimensioner stiller store krav til flexibilitet.

11. Afsluttende bemærkninger

I det foregående er hovedvægten lagt på en detaljeret beskrivelse af forsøgsopstillingen og forsøgenes udførelse samt de registrerede måledata. Når der ikke herudover er foretaget en videre bearbejdning og fortolkning af forsøgsresultaterne, skyldes det, at der sideløbende med nærværende rapportering udføres en forsøgsrække til bestemmelse af de omhandlede konstruktionsståls arbejdslinier ved høje temperaturer.

Disse forsøg udføres på Dantest, København (tidligere Statsprøveanstalten), og først når resultatet af disse materialprøver foreligger, er der grundlag for en videre bearbejdning af de her omhandlede forsøgs resultater.

12. Litteratur

- [1] European Convention for Constructional Steelwork, Commission 3:
European Recommendation for the Design of Steel Structures exposed to
the Standard Fire. June 1979.
- [2] Carlsen, B.-E., B.C.Jensen, F.B.Olesen & E.Pedersen:
Brandteknisk dimensionering. En indstilling om indarbejdning af brand-
tekniske dimensioneringsmetoder i DIF's konstruktionsnormer. København,
september 1977.
- [3] Hviid, N.J. & F.B.Olesen:
AUC's brandlaboratorium. Instituttet for Bygningsteknik, Aalborg Univer-
sitetscenter. Rapport nr. 7708. Oktober 1977.
- [4] Pettersson, O:
Knäckning. Lund Institute of Technology. Division of Structural Mecha-
nics and Concrete Construction. Bulletin 24. Lund, 1971.

